



Escola Universitària d'Enginyeria  
Tècnica Industrial de Barcelona  
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## Memòria



# ESTIMACIÓ DE LA DEMANDA DE VEHICLES ELÈCTRICS URBANS

TFG presentat per optar al títol de GRAU en  
ENGINYERIA de l'ENERGIA  
per **Maurici Yagües Gomà**

Barcelona, 4 de desembre de 2013

Director: Roberto Villafáfila Robles  
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



# ÍNDEX MEMÒRIA

Resum . . . . .	9
Resumen . . . . .	9
Abstract . . . . .	9
Agraïments . . . . .	11
<b>CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ</b>	<b>13</b>
1.1 Motivació . . . . .	13
1.2 Objectius . . . . .	13
1.3 Abast . . . . .	14
<b>CAPÍTOL 2: MODELITZACIÓ DE LA DEMANDA ELÈCTRICA DEL VE</b>	<b>15</b>
2.1 Tipus de vehicles elèctrics . . . . .	15
2.1.1 Vehicles elèctrics (VE) . . . . .	16
2.1.2 Vehicles híbrids (VH) . . . . .	16
2.1.3 Vehicles híbrids endollables (VHE) . . . . .	17
2.2 Aspectes generals de les bateries . . . . .	17
2.2.1 Tipus de bateries utilitzades en l'automoció . . . . .	18
2.2.2 Característiques de les bateries d'ió liti . . . . .	19
2.2.3 Envelliment de les bateries d'ió liti . . . . .	21
2.2.4 Procés de càrrega de bateries d'ió liti . . . . .	22
2.3 Mobilitat urbana . . . . .	25
2.4 Simulació basada en agents . . . . .	25
2.4.1 Característiques dels agents . . . . .	26
<b>CAPÍTOL 3: MODELITZACIÓ DE LA MOBILITAT DELS USUARIS</b>	<b>27</b>
3.1 Dades bàsiques de la mobilitat . . . . .	27
3.2 Motius de desplaçament . . . . .	28
3.3 Desplaçaments diaris per usuari . . . . .	28
3.3.1 Distància per desplaçament . . . . .	30
3.4 Distribució temporal . . . . .	32
<b>CAPÍTOL 4: MODELITZACIÓ DE LES BATERIES</b>	<b>33</b>

4.1 Càrrega de les bateries d'ió liti . . . . .	33
4.2 Model d'envelliment de les bateries . . . . .	38
4.2.1 Model d'envelliment passiu . . . . .	39
4.2.2 Model d'envelliment actiu . . . . .	40
4.2.3 Envelliment acumulat . . . . .	40
<b>CAPÍTOL 5: MODEL PROPOSAT I ABAST</b>	<b>43</b>
5.1 Escenaris de càrrega . . . . .	43
5.1.1 Cas 1: Càrrega al final del dia . . . . .	43
5.1.2 Cas 2: Càrrega al final del dia amb suport entre desplaçaments	44
5.1.3 Cas 3: Càrrega amb discriminació horària . . . . .	44
5.2 Estructura general del model . . . . .	44
5.3 Limitacions de la simulació . . . . .	45
<b>CAPÍTOL 6: CAS PRÀCTIC</b>	<b>49</b>
6.1 Escenari de la simulació . . . . .	49
6.2 Resultats de la mobilitat . . . . .	51
6.2.1 Resultats referents als desplaçaments . . . . .	51
6.2.2 Resultats referents a la distribució horària . . . . .	52
6.3 Cas 1: Càrrega al final del dia . . . . .	55
6.4 Cas 2: Càrrega al final del dia amb suport entre desplaçaments . . .	59
6.5 Cas 3: Càrrega amb discriminació horària . . . . .	63
<b>CAPÍTOL 7: CONCLUSIONS</b>	<b>67</b>
7.1 Treballs futurs . . . . .	68
<b>CAPÍTOL 8: BIBLIOGRAFIA</b>	<b>69</b>
8.1 Referències bibliogràfiques . . . . .	69
8.2 Bibliografia de consulta . . . . .	73
<b>PRESSUPOST</b>	<b>77</b>

## ÍNDEX DE FIGURES

2.1	Gràfic Ragone i objectius d'autonomia . . . . .	19
2.2	Comparativa de les principals característiques de tecnologies basades en ió liti . . . . .	20
2.3	Tensió i corrent en el procés de càrrega de la bateria d'ió liti . . . . .	23
2.4	Càrrega de la bateria d'ió liti a 2C, 1C, 0,5C i 0,2C . . . . .	24
2.5	Modes de càrrega contemplats per la IEC - 61851-1 . . . . .	24
3.1	Distribució horària dels desplaçaments segons el motiu . . . . .	29
3.2	Quilometratge recorregut en un dia normal entre setmana . . . . .	30
3.3	Distribució horària dels desplaçaments segons el motiu . . . . .	32
4.1	Perfil de la bateria . . . . .	34
4.2	Estratègies de càrrega per una bateria de 14 kWh . . . . .	35
4.3	Corbes del procés de càrrega d'una bateria d'ió liti . . . . .	36
4.4	Diagrama del procés de càrrega de la bateria d'ió liti . . . . .	37
4.5	Diagrama del procés d'envelliment de la bateria d'ió liti . . . . .	41
5.1	Diagrama general de la simulació . . . . .	46
6.1	Valors de la desviació típica estàndard de la potència mitjana per usuari . . . . .	50
6.2	Desviació típica en funció dels dies simulats i per cada cas . . . . .	50
6.3	Caracterització dels agents de la simulació . . . . .	51
6.4	Resultats del mòdul de mobilitat referents a la distància . . . . .	53
6.5	Distribucions horàries per als diferents motius . . . . .	54
6.6	Perfil de potència per al Cas 1 . . . . .	55
6.7	Estat de càrrega de la bateria per a l'inici i el final del procés de càrrega en el Cas 1 . . . . .	57
6.8	Estat de la bateria per al Cas 1 . . . . .	58
6.9	Estat de la bateria per tipus de vehicle al Cas 1 . . . . .	58
6.10	Energia consumida per tots els vehicles i desplaçaments no realitzat per VE i M . . . . .	58

6.11	Perfil de potència per al Cas 2 . . . . .	59
6.12	Estat de càrrega de la bateria per a l'inici i el final del procés de càrrega en el Cas 2 . . . . .	61
6.13	Estat de la bateria per al Cas 2 . . . . .	62
6.14	Estat de la bateria per tipus de vehicle al Cas 2 . . . . .	62
6.15	Energia consumida per tots els vehicles i desplaçaments no realitzat per VE i M . . . . .	62
6.16	Perfil de potència per al Cas 3 . . . . .	63
6.17	Comparativa dels perfils de potència dels diferents escenaris . . .	64
6.18	Estat de càrrega de la bateria per a l'inici i el final del procés de càrrega en el Cas 3 . . . . .	65
6.19	Comparativa de l'estat de la bateria pels usuaris del Cas 3 per a diferents temperatures . . . . .	66
6.20	Estat de la bateria per tipus de vehicle al Cas 3 i per $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . .	66

## ÍNDEX DE TAULES

2.1 Tipologies de vehicles elèctrics resumides . . . . .	18
3.1 Desplaçaments diaris en transport privat i tipus de vehicles . . . . .	28
3.2 Parc de vehicles . . . . .	28
3.3 Motius de desplaçament en vehicles privats . . . . .	29
3.4 Dades de mobilitat pels usuaris del Nissan Leaf i el Chevy Volt . . . .	31





## **RESUM**

El present treball pretén elaborar un algorisme que permeti simular, d'una banda, la demanda energètica dels vehicles elèctrics en la xarxa, i de l'altra, l'envel·liment associat a les bateries. El model ha estat programat amb MATLAB®, procurant que les condicions d'operació siguin fàcilment ajustables.

En la primera part del treball, es fa una introducció a la teoria dels vehicles elèctrics, fent èmfasis als processos de càrrega i envel·liment de les bateries. En la segona part, es desglossen els diferents mòduls del model, i se'n explica el funcionament i l'origen de les dades d'entrada. També s'expliquen les simplificacions necessàries que s'han adoptat. Finalment, es realitzarà un cas pràctic que permeti avaluar el correcte funcionament del model, mostrar els resultats dels diferents escenaris de càrrega i extreure'n conclusions.

## **RESUMEN**

El presente trabajo pretende elaborar un algoritmo que permita simular, la demanda energética de los vehículos eléctricos en la red, y el envejecimiento asociado a las baterías. El modelo ha sido programado en el software MATLAB®, procurando que las condiciones de operación sean fácilmente ajustables.

En la primera parte del trabajo, se hace una introducción a la teoría de los vehículos eléctricos, poniendo énfasis en los procesos de carga y envejecimiento de las baterías. En la segunda parte, se desglosan los diferentes módulos del modelo, y se explica su funcionamiento y el origen de los datos de entrada. Finalmente, se realizará un caso práctico que permita evaluar el correcto funcionamiento del modelo, y extraer las conclusiones pertinentes.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is the elaboration of an algorithm that simulates, first, the energetic demand of electric vehicles in the grid, and second, the associated battery ageing. The model has been coded using the MATLAB® software, and the operating conditions are easily adjustable.

In the first part, the state of the art in electric vehicle technology is reviewed, focusing in battery technology and charging characteristics. Furthermore, a quick glance to agent based modelling is given. The second part aims to analyse each part of the model, explaining the different processes, and the input data sources. Additionally, a detailed list of the simplifications and assumptions that have been adopted is provided and explained. Finally, the model is run with different charging scenarios in order to evaluate its correct implementation, and obtain conclusions.



## **AGRAÏMENTS**

Agrair a Roberto Villafáfila i Pol Olivella el temps, l'ajuda i l'entusiasme dedicat durant aquests mesos.

Agrair especialment a la meva mare i al meu germà tot el suport.

Finalment, als companys d'universitat, per tots aquests anys.



# CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

## 1.1 Motivació

La motivació d'aquest projecte va sorgir arran de la presentació impartida per Salvador Acha titulada *Modelling Spatial and Temporal Agent Travel Patterns for Optimal Charging of Electric Vehicles in Low Carbon Networks* en la VII International Conference on Energy Innovation "Smart Grid Technology", organitzada pel Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC). La problemàtica proposada pel conferenciant, referent a l'impacte dels vehicles elèctrics en la xarxa, era extensament estudiada, per això es va fer també una avaluació de la vida útil de la bateria, utilitzant un patró de mobilitat, de manera que permetés observar quin era l'efecte de la degradació de la bateria en els hàbits de conducció dels usuaris.

## 1.2 Objectius

L'objectiu del projecte és desenvolupar un model que permeti avaluar la demanda elèctrica de vehicles urbans. És important que el model sigui flexible i fàcilment editable, per tal de que pugui ser avaluat en diferents condicions. Els objectius són els següents

- Elaborar un perfil de mobilitat amb bases estadístiques
- Implementar un algorisme de càrrega basat en bateries d'ió liti
- Implementar un algorisme d'envelliment de bateries d'ió liti en funció de la seva utilització i de la temperatura de la bateria
- Elaborar un model que combini els algorismes per tal d'avaluar la demanda elèctrica

## 1.3 Abast

El projecte es limita a fer una simulació de tipus virtual, tot i que els valors dels diferents algorismes utilitzats provenen d'experiments elaborats amb bateries reals. Encara que posteriorment es detalla cadascuna de les limitacions del model, a continuació se n'han resumit les principals:

- L'estudi es centra en un període de 10 anys, durant els quals només es tindran en compte els patrons de mobilitat en dies feiners.
- S'utilitzen les dades de mobilitat referents a la ciutat de Barcelona.
- S'han considerat vehicles de diferents arquitectures, com vehicles elèctrics, vehicles híbrids i motos.
- S'han generalitzat tots els tipus de bateria, i es considera que tots els tipus de vehicles utilitzen bateries d'ió liti.

# **CAPÍTOL 2:**

## **MODELITZACIÓ DE LA**

## **DEMANDA ELÈCTRICA**

## **DEL VE**

En aquest capítol s'introdueixen els diferents temes tractats en l'elaboració del model. Primer, es farà una introducció a les tecnologies de vehicles elèctrics existents. Posteriorment, s'explicaran les tipologies de bateries utilitzades en vehicles elèctrics i les principals característiques en el procés de càrrega, a més de les causes de l'envelliment. Finalment, s'introdueix la metodologia del modelatge basat en agents i els estudis de mobilitat.

### **2.1 Tipus de vehicles elèctrics**

El vehicle elèctric presenta un nou escenari en el món del transport tal i com el coneixem, i obre la porta a nous models de negoci i oportunitats en el sector elèctric (Román et al. 2011). Tot i que avui en dia es presenta el cotxe elèctric com una proposta de futur, amb una major penetració a mig i llarg termini, el vehicle elèctric va ser inventat abans que el de combustió interna. El fàcil accés als combustibles fòssils va propiciar un ràpid progrés en els vehicles de combustió interna que, juntament amb les limitacions associades a les bateries, va relegar el cotxe elèctric a un segon terme, amb una utilització marginal. Va ser la crisi energètica dels 70 la que va posar el focus en el desenvolupament del vehicle elèctric i, més recentment, la preocupació per les emissions. Tot això, ha portat a molts organismes governamentals a aplicar polítiques favorables a la implantació del vehicle elèctric (Pallisé et al. 2010; Larminie i Lowry 2003).

Amb el vehicle elèctric es busca l'estalvi energètic, mitjançant un control electrònic molt més complex que en el vehicle de combustió interna. Es pot definir la filosofia del vehicle elèctric com la unió entre l'enginyeria d'automoció i l'e-

lèctrica, incloent el motor i el seu controlador, els convertidors electrònics de potència que permeten carregar la bateria i altres sistemes d'emmagatzematge i gestió energètica (Chan 2007). En el cas dels vehicles híbrids s'intenta combinar dues tecnologies de propulsió per aconseguir unes prestacions millors de les que es podrien obtenir per separat, optimitzant la utilització d'energia i eliminant les limitacions que pot suposar la bateria com a únic sistema de propulsió. Altres tecnologies, com la pila de combustible, estan en desenvolupament, i és necessari un coneixement més extens del seu funcionament i comportament.

Els vehicles elèctrics actuals es poden representar en les categories següents, i se'n resumeixen els trets principals en la Taula 2.1:

### 2.1.1 Vehicles elèctrics (VE)

Els vehicles elèctrics purs utilitzen un motor elèctric per propulsar-se, i energia química de les bateries per emmagatzemar l'energia. Són el tipus més simple des del punt de vista conceptual, però al ser la bateria l'única font de propulsió, haurà de ser capaç de proporcionar la potència i l'energia per a l'acceleració i el rang d'autonomia adequats. El *pack* de bateries és el component més car del vehicle, i també en suposa una part molt important del pes (Pistoia 2010). Un exemple de vehicle elèctric pur és el Nissan Leaf.

Dins d'aquest grup s'inclouen els vehicles elèctrics de baixa potència i menor mida, com les motocicletes i bicicletes elèctriques, que són encara més limitats, en autonomia i potència, que els convencionals.

### 2.1.2 Vehicles híbrids (VH)

Els vehicles híbrids es poden definir com un estat intermedi entre el vehicle de combustió interna i el vehicle elèctric. Estan propulsats per un motor de combustió interna i un motor elèctric que desenvolupa una funció de suport, incrementant l'eficiència global, i recuperant l'energia de la frenada (Pallisé et al. 2010). Gestionar dos mètodes de propulsió suposa una major complexitat, el que requereix el desenvolupament d'algorismes de control i operació. Hi ha 3 subgrups de vehicles híbrids, depenent de la mida del motor elèctric:

- **Microhíbrid o *start-stop***

El seu motor elèctric és d'uns 2,5 kW, i les bateries són de Ni-MH i plom (Chan 2007). Al tractar-se de components de baixes prestacions, el seu preu no és molt superior al d'un vehicle convencional. La funció principal del motor elèctric és al reprendre la marxa, després d'una aturada curta, quan un alternador reversible arrenca el motor utilitzant energia recuperada prèviament en la frenada regenerativa. L'estalvi de combustible es calcula que està entre el 5 i el 10%, i només es produeix en cicle urbà (Karagianopoulos 2012; LIVE Barcelona 2013).

- **Semihíbrid o *mild-hybrid***

La mida del motor oscil·la entre els 10 i 20 kW, i està directament acoblat amb el motor de combustió. El motor elèctric té la funció d'assistir en l'ac-



celeració del cotxe, però no li serà possible impulsar-se de manera 100% elèctrica, de manera que el motor de combustió seguirà sent el mitjà de propulsió primari. Per aquest tipus de vehicles, l'estalvi de combustible es situa entre el 15 i el 30%, i com que les prestacions de les bateries són superiors, s'utilitzen bateries de Ni-MH, encarint més el preu final del vehicle (Chan 2007; Karagiannopoulos 2012; LIVE Barcelona 2013).

- **Híbrid pur o full-hybrid**

En aquest cas el motor elèctric arriba als 50 kW i pot actuar de manera autònoma al de combustió. El preu final és bastant més elevat i pot suposar un increment d'entre un 30 i 40%, ja que les bateries també seran de major mida. Tot i així, és el que ofereix major versatilitat en el funcionament, i suposa un estalvi de combustible d'entre el 30 i 50% (Chan 2007; Karagiannopoulos 2012).

### 2.1.3 Vehicles híbrids endollables (VHE)

Aquest tipus de vehicles són una variació dels VH, que incorpora un endoll amb el qual es pot connectar a la xarxa per a carregar la bateria, a més de la frenada regenerativa. En aquesta categoria es situen en gran part els híbrid purs, ja que són els únics que tenen una bateria prou gran com per aprofitar-se d'una connexió a la xarxa. Es poden definir dues arquitectures:

- **VHE en sèrie**

En aquest cas l'energia química del motor es transforma en elèctrica, mitjançant un generador, i es transmet directament a la bateria. L'eficiència d'aquest procés variarà amb el rendiment de l'alternador. L'aspecte positiu és que permet mantenir el motor de combustió en un règim constant i en el punt de rendiment òptim. Tot i així, el dimensionament dels motors serà elevat, ja que hauran de generar tota la potència necessària per a conduir en qualsevol condició, urbà o autopista (Pallisé et al. 2010).

- **VHE en paral·lel**

La configuració en paral·lel permet combinar les prestacions dels motors elèctrics i de combustió, ja que poden actuar de manera conjunta. No requereix un generador, els elements tenen unes mides inferiors als vehicles que tenen arquitectura en sèrie, i no tenen pèrdues associades a les transformacions energètiques. Això permet treballar amb uns components menys pesats, i més barats (Pistoia 2010), però obliga a utilitzar eines de control més complexes, ja que s'ha de combinar el funcionament dels motors de combustió i elèctrics (Larminie i Lowry 2003).

## 2.2 Aspectes generals de les bateries

L'emmagatzematge d'energia és un aspecte fonamental de l'operació dels vehicles híbrids i elèctrics. La complexitat d'obtenir una bateria amb unes bones

**Taula 2.1:** Tipologies de vehicles elèctrics resumides.

Font: Chan (2007); Pallisé et al. (2010)

	Vehicle elèctric	Vehicle híbrid
Propulsió	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor elèctric</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor elèctric</li> <li>• Motor de combustió</li> </ul>
Sistemes d'energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bateria</li> <li>• Supercondensadors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bateria</li> <li>• Supercondensadors</li> <li>• Motor de combustió</li> </ul>
Fonts d'energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Xarxa elèctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Xarxa elèctrica (VHE)</li> <li>• Gasolineres</li> </ul>
Característiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissions nul·les</li> <li>• Elevada eficiència energètica</li> <li>• Autonomia limitada</li> <li>• Cost inicial elevat</li> <li>• Independència dels combustibles fòssils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissions baixes</li> <li>• Elevada eficiència energètica</li> <li>• Autonomia elevada</li> <li>• Cost inicial elevat</li> <li>• Dependència dels combustibles fòssils</li> </ul>

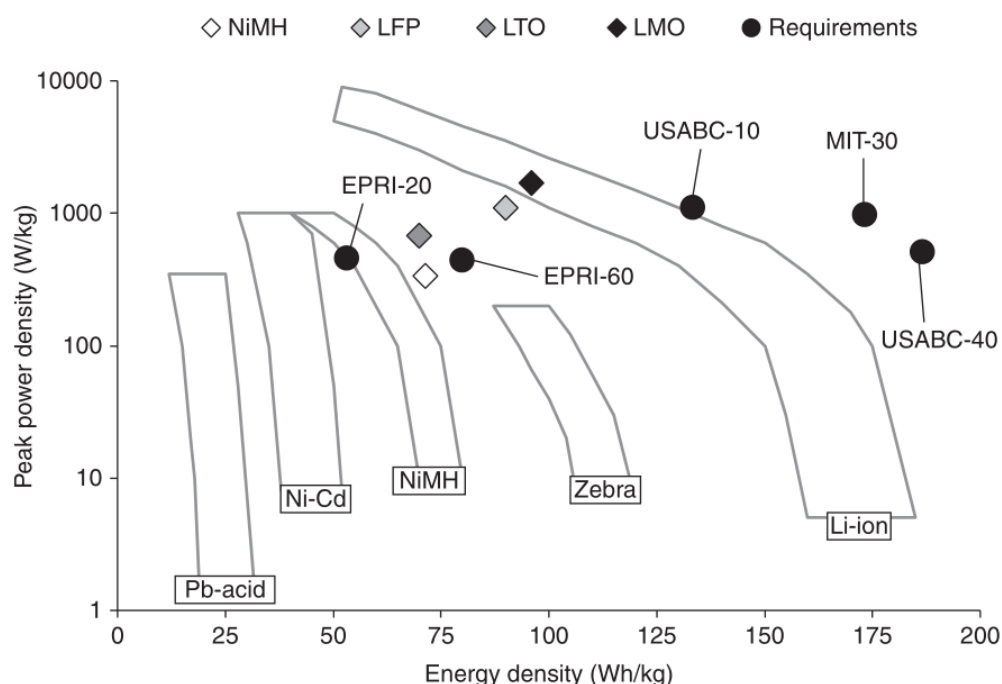
prestacions, i de preu reduït, és la principal barrera comercial amb la que es troba el vehicle elèctric (Duleep et al. 2011).

### 2.2.1 Tipus de bateries utilitzades en l'automoció

Tot i que existeix una àmplia gamma de bateries basades en diferents materials químics, no totes poden proporcionar els requeriments energètics que demanen els vehicles híbrids i elèctrics. Per això, la gran majoria de les bateries utilitzades en els vehicles de nova construcció formen part de la família del ió liti, que conviuen amb les de níquel-hidrur metàl·lic (Ni-MH), ja que encara són bastant utilitzades per a vehicles híbrids de la primera generació. Es preveu que durant els pròxims anys es redueixin els costos de fabricació de les bateries d'ió liti, al mateix temps que es milloren les prestacions energètiques i arribar fins al 70% de quota de mercat el 2015 (Kalhammer et al. 2007; Axsen, Burke i Kurani 2010; Marra et al. 2012).

En la Figura 2.1 es mostren les característiques de les principals bateries utilitzades actualment en l'automoció. S'ha de constatar que en els gràfics Ragone es donen els valors pels rendiments de cel·la, tot i que els objectius d'autonomia s'especifiquen per bateries. Aquestes, estan constituïdes per mòduls agrupats de cel·les (Dinger et al. 2010). Al ajuntar els mòduls i configurar els circuits es produeix un augment del volum, del pes i de la resistència, que en redueix les prestacions energètiques. Per això s'aplica un factor d'entre el 0,6 i el 0,8 al fer la transició de les prestacions de cel·les a bateries (Axsen, Burke i Kurani 2010; Duleep et al. 2011). Els diamants es refereixen als tests efectuats per Axsen, Burke i Kurani (2010) de models concrets de cada tecnologia.

No es preveu la producció en massa de noves tecnologies en aquest àmbit fins



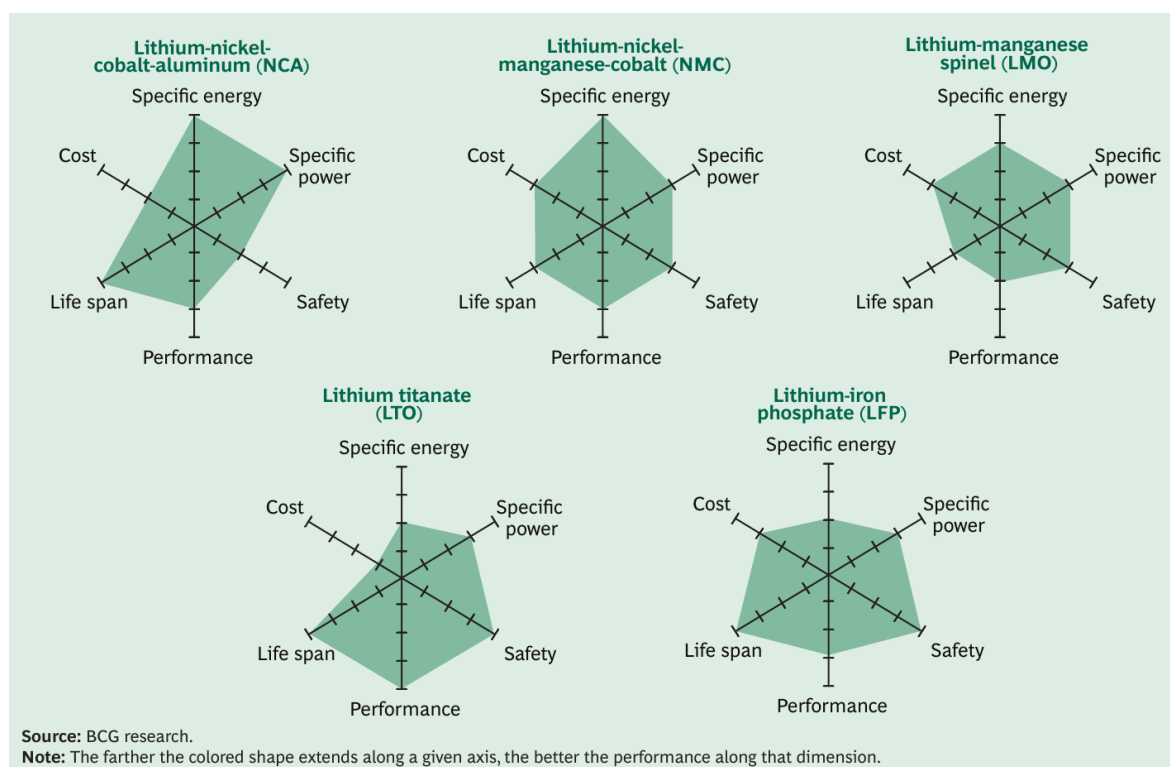
**Figura 2.1:** Gràfic Ragone i objectius d'autonomia utilitzant un factor de 0,75. Font: Axsen, Burke i Kurani (2010)

al 2020, però es calcula que el cost de retorn per a cada generació de bateries és d'entre 4 i 5 anys, pel que als voltants del 2017 es podrà veure una millora en les prestacions coincidint amb la segona generació de bateries per l'automoció (Dinger et al. 2010; LIVE Barcelona 2013). En la fase posterior al 2020 s'esperen noves tecnologies com el liti-silici, liti-sulfur i liti aire (Buchmann 2001; Linden i Reddy 2002; Duleep et al. 2011).

### 2.2.2 Característiques de les bateries d'ió liti

Les bateries basades en la tecnologia d'ió liti agrupen un conjunt de bateries amb diferents òxids metàl·lics en el càtode, i un ànode format per grafit, en la majoria dels casos. Això suposarà que hi haurà diferents avantatges i inconvenients pel que fa a seguretat, prestacions i cost, entre d'altres. Pel que fa a vehicles elèctrics les més utilitzades són les de liti-níquel-cobalt-alumini (NCA), liti-níquel-manganès (NMC), liti-manganès (LMO), liti titani (LTO), i liti-ferro fosfat (LFP), mentre que les d'òxid liti-cobalt (LCO) s'utilitzen en els dispositius electrònics portàtils (Kalhammer et al. 2007; Dinger et al. 2010). En la Figura 2.2 hi ha una comparativa de les característiques que ofereixen les diferents configuracions. S'ha d'entendre que els fabricants han de buscar un equilibri entre seguretat (LFP i LTO) i capacitat energètica (NCA, NMC i LMO), on acostuma a predominar la primera.

Aquestes bateries són més sensibles que les de tecnologies anteriors, com les de Ni-MH, níquel-cadmi (Ni-Cd), o bateries de plom. Per això, totes les tecnologies requereixen un seguiment electrònic constant, sistemes de control tèrmic, i sistemes d'equilibri de cel·les (Moore i Schneider 2001; Elias et al. 2003; Röbber 2008; Wen 2009; Bergveld 2010). També són més vulnerables als processos



**Figura 2.2:** Comparativa de les principals característiques de tecnologies basades en ió liti. Font: Dinger et al. (2010)

d'envelliment i, per això, requereixen uns algorismes de control més avançats, que permetin tenir un coneixement exhaustiu dels paràmetres de la bateria, per poder preveure el seu funcionament i operar-la amb seguretat.

Hi ha diversos factors que fan aquesta tecnologia més interessants que d'altres de més conegudes i estudiades. D'una banda, el rang d'operació per cel·la, que va de 4 a 3,5 V (Kalhammer et al. 2007), i un volum inferior a les altres tecnologies són la principal raó de l'elevada densitat energètica. A més, tenen una baixa autodescàrrega i poden operar en un ampli rang de temperatures (Linden i Reddy 2002). D'altra banda, la seva fragilitat requereix circuits de seguretat que limiten els corrents, tot i que encara preocupa la seva fiabilitat i l'envelliment segueix sent una de les majors problemàtiques. L'elecció dels metalls i additius ajuden a equilibrar les preferències entre una alta densitat energètica, una major vida útil o millor seguretat d'operació. Per exemple, en el cas de les bateries NCA, una major concentració de níquel en comptes de cobalt incrementa la capacitat, i en redueix el cost, però la fa menys segura (Buchmann 2001).

Les bateries amb tecnologia d'ió liti són les que tenen més perspectives de millora a mig i llarg termini, i les principals empreses fabricants estan treballant en millores per a totes les tecnologies possibles (Kalhammer et al. 2007; Axsen, Burke i Kurani 2010). Actualment, s'acosten a molts dels objectius actuals per a potència i autonomia, com demostra la Figura 2.1, però pot ser que no sigui fins a les tecnologies posteriors al 2020 que no hi hagi un salt qualitatiu important.

### 2.2.3 Envelliment de les bateries d'ió liti

Una de les conseqüències principals, de l'envelliment de la bateria, és la reducció del pic de potència que pot generar la bateria, causat per l'augment de la resistència, que reduirà el parell del motor. A més, la disminució de la càrrega, per la transformació dels materials actius en inactius, suposa una reducció de l'autonomia, i l'increment en la inestabilitat de l'operació (Broussely et al. 2005; Duleep et al. 2011).

L'envelliment de la bateria és una problemàtica similar a la de l'autonomia que, com s'ha explicat en la secció 2.2.1, segueix sent un dels majors impediments en la comercialització dels vehicles elèctrics. Així com la millora de la densitat energètica sembla una qüestió de temps, l'envelliment té més a veure amb la comprensió dels fenòmens químics que es produeixen entre l'ànode i el càtode de la bateria, i com varien en diferents condicions, per poder actuar d'acord a les necessitats.

A partir dels articles de Broussely et al. (2005); Kalhammer et al. (2007); Dinger et al. (2010) i Millner (2010) es poden definir els processos d'envelliment en dos fases:

- **Envelliment passiu** (*Aging on rest* o *Calendar life*): en aquest estat l'únic factor d'envelliment és l'estabilitat termodinàmica dels components. La temperatura de la bateria té una elevada incidència en la reactivitat dels components.
- **Envelliment actiu** (*Aging on cycling*): es produeix a efectes induïts per la cinètica i a les variacions volumètriques dels materials en l'ànode i el càtode. Els corrents elevats provoquen estrès en els materials i pot originar la reducció dels elements actius.

Es considera que una bateria arriba al final de la seva vida quan l'estat de càrrega màxim és igual al 80% de la capacitat inicial de la bateria, o la seva potència màxima s'ha reduït un 25% (Duleep et al. 2011). L'envelliment passiu actual és d'entre 10 i 15 anys a 25 °C (Pistoia 2010; LIVE Barcelona 2013), o per una temperatura inferior a 45 °C sempre que l'estat de càrrega mitjà sigui del 50% (Kalhammer et al. 2007). D'altra banda, Duleep et al. (2011), considera que l'objectiu és de 15 anys amb una temperatura de 35 °C, però que actualment no passa de 10, i el comportament en condicions extremes és incert.

Pel que fa a l'envelliment actiu, el valor actual s'ajusta a les necessitats dels usuaris, 5000 cicles utilitzant la franja de 10% a 90% de l'estat de càrrega (Smith et al. 2010; Duleep et al. 2011). Dinger et al. (2010) també conclouen que s'han assolit els objectius d'envelliment actiu, però no per al passiu, principalment per les elevades temperatures ambientals. Les millores que proposen són augmentar la capacitat de la bateria, limitant-ne el seu ús a una franja inferior al 100%, i desenvolupar un sistema d'intercanvi de mòduls (LIVE Barcelona 2013). Els inconvenients en el primer cas són un major cost i pes del vehicle, i en el segon la necessitat de tenir una arquitectura de bateries estàndard.

Al *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* fa temps que s'estudia la incidència de la temperatura en els processos químics de la bateria. Per això, en els

últims anys s'han estudiat sistemes de gestió tèrmica. S'ha analitzat que amb un bon disseny del vehicle i un sistema de refrigeració, líquid o d'aire, és possible allargar la vida de la bateria substancialment, mantenint-la en uns rangs de temperatura favorables (Smith et al. 2010; Wood et al. 2012; Yuksel i Michalek 2012; Fan, Khodadadi i Pesaran 2013).

Les bateries poden tenir una segona vida, ja que el 80% de la capacitat inicial encara serà útil per a moltes altres aplicacions. Es contemplen activitats com sistemes d'emmagatzematge estàtic, que permetrien optimitzar la xarxa elèctrica, però el desconeixement del comportament de les bateries a llarg termini segueix sent un problema (Duleep et al. 2011; LIVE Barcelona 2013).

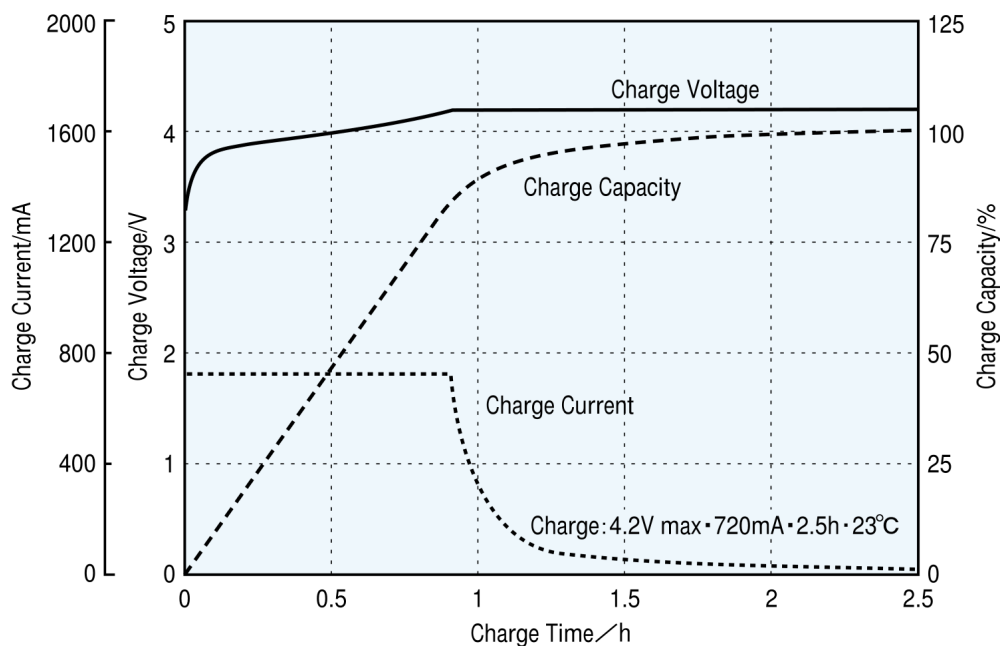
#### 2.2.4 Procés de càrrega de bateries d'ió liti

El procés de càrrega, com s'ha vist en la secció anterior, pot afectar l'envelliment actiu de la bateria si s'utilitzen corrents elevats. Tampoc és susceptible a la sobrecàrrega, com sí ho són d'altres tecnologies, ja que pot generar estrès i envelliment prematur, i elevar les temperatures fins a nivells perillosos.

El procés de càrrega té diferents etapes, que s'inicien en funció de la tensió de la bateria. Aquest voltatge serà una lectura directa de l'estat de càrrega de la bateria. Les etapes són les següents:

- **Precàrrega:** En aquesta fase el corrent de càrrega és de 0,1C A (on C és la capacitat de la bateria), i es produeix mentre la cel·la té una tensió inferior a 2,5 o 3 V (Young et al. 2013). Aquesta situació es produeix quan es carrega la bateria després d'un llarg període d'inactivitat, o per saber si existeix algun curtcircuit.
- **Corrent constant (*Constant Current* - CC):** En aquest tram, l'objectiu és que l'estat de càrrega incrementi linealment respecte el temps. La tensió pujarà fins als 4,1 o 4,2 V, amb una tolerància del 1%, per cel·la (Linden i Reddy 2002). El corrent de càrrega en aquest període serà d'entre 0,5C i 1C, depenent de les especificacions dels fabricant, o les necessitats de l'usuari. En aquesta fase es vol augmentar la càrrega de la bateria el més aviat possible, fins arribar al 85% (Elias et al. 2003) o 90% (Marra et al. 2012).
- **Tensió constant (*Constant Voltage* - CV):** Un cop s'ha arribat a la tensió màxima de la cel·la, no és segur continuar carregant amb el mateix corrent, ja que es produiria una sobrecàrrega que podria generar avaries en la bateria. Per això es redueix el corrent de manera exponencial fins que arriba a 2 o 3% del corrent inicial, moment en el que finalitza la càrrega. En aquest tram l'estat de càrrega passarà del 90% al 100%.
- **Mode *standby*:** En aquest punt la bateria ja no rep més càrrega, pel que la seva tensió baixarà passat un cert temps, per la pròpia autodescàrrega. S'activarà llavors una càrrega de molt baixa intensitat per tal de recuperar els nivells de tensió.

En la Figura 2.3 es mostra el perfil del corrent i la tensió durant els processos de CC i CV. En la Figura 2.4 es mostra l'estat de càrrega de la bateria per a diferents règims de càrrega C. És interessant observar-ne els diferents perfils, ja que un major règim de càrrega proporciona un menor temps de càrrega, però només fins al 90% de la capacitat. A partir d'aquest punt, el règim ja no és controlable, i és similar per a tots. Per això només el període CC és apte per a la regulació de potència (Marra et al. 2012). A més, la càrrega amb intensitats elevades incrementa l'estrès de la bateria i, en conseqüència, l'envelliment.

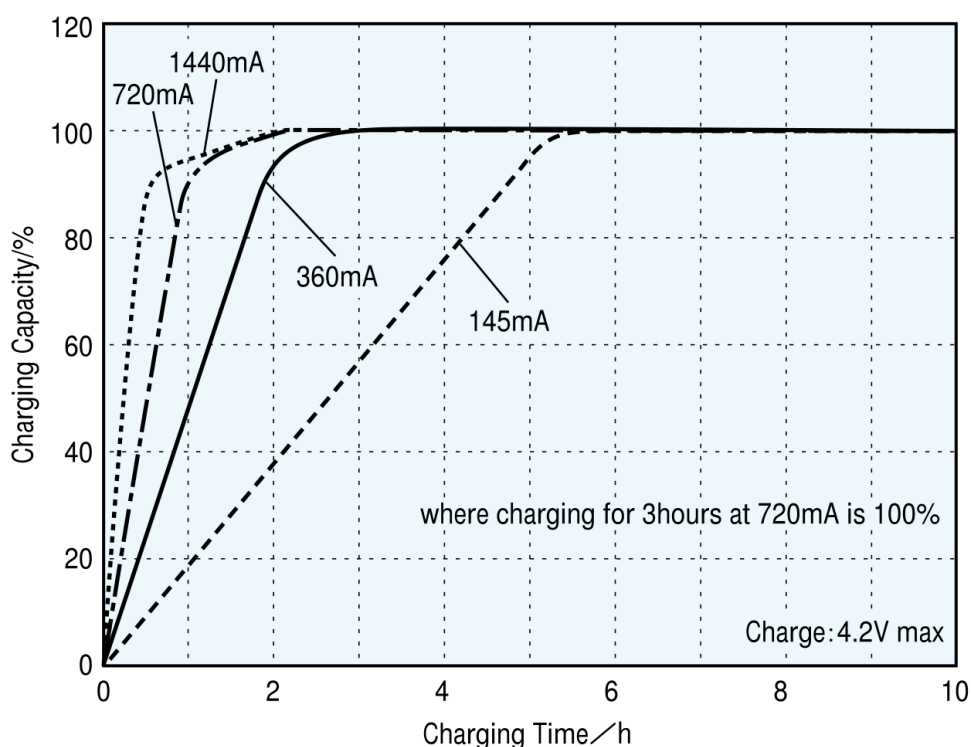


**Figura 2.3:** Tensió i corrent en el procés de càrrega de la bateria d'ió liti. Font: Sony (2005)

El procés de càrrega de la bateria d'ió liti és relativament senzill, i es pot simplificar, en la majoria dels casos, als períodes de CC i CV. A més, depenent de quins siguin els límits d'utilització de la bateria, només és necessària la fase CC de la càrrega. Molts autors recomanen utilitzar la bateria en un rang d'entre el 10 i el 90% (Smith et al. 2010; Duleep et al. 2011; Barra et al. 2012), per evitar l'estrès de tensió que suposen els extrems, i allargar-ne la vida. Aquesta estratègia s'utilitza en vehicles com el Chevy Volt on la franja va del 22 al 87%. Solucions similars es proposen a Dinger et al. (2010), com s'ha vist en la secció 2.2.3.

Aquestes solucions no només són positives des del punt de vista de l'envelliment de la bateria, sinó que també tenen avantatges en l'eficiència del procés. En general el rendiment de la bateria és força bo, ja que és una tecnologia amb una absorció d'energia molt bona, i les pèrdues són, majoritàriament, de la resistència interna. El problema apareix quan s'observa el procés de càrrega des de la xarxa. El període de càrrega en CV és molt poc eficient, ja que l'increment de la capacitat és molt baix per l'energia i el temps que s'utilitza (Barra et al. 2012). A més s'ha de tenir en compte el rendiment del convertidor que està entre el 88 i el 90% (Clement, Haesen i Driesen 2009; Clement-Nyns, Haesen i Driesen 2010; Gao et al. 2011; Barra et al. 2012). Per això, tot i que finalitzar la càrrega al 100% suposa una millora en l'autonomia del vehicle, també s'han de considerar





**Figura 2.4:** Càrrega de la bateria d'ió liti a 2C (1440 mA), 1C (720 mA), 0,5C (360 mA) i 0,2C (145 mA). Font: Sony (2005)

els diversos inconvenients.

Un altre dels aspectes a considerar és el nivell de càrrega. Això vol dir quins nivells de corrent s'utilitzaran durant el període de CC. En la Figura 2.5 es mostren els modes de càrrega classificats per la normativa de la *International Electrotechnical Commission* (IEC). En el cas de les connexions domèstiques la potència màxima és de 3,7 kW, i es preveu que aquest sigui el nivell de càrrega més habitual, ja que és suficient per carregar la bateria completament durant la nit (8 hores aproximadament), al mateix temps que no la sotmet a un estrès abusiu que la podria malmetre. La majoria d'estudis que s'han desenvolupat en els últims anys, utilitzen aquests nivells per predir la càrrega en la xarxa (Clement, Haesen i Driesen 2009; Clement-Nyns, Haesen i Driesen 2010; Marra et al. 2012).

Modo Salida	Conector específico para VE	Tipo carga	Corriente máxima	Protecciones	Características especiales
Modo 1	No	Lenta en CA	16 A por fase (3,7 kW - 11 kW)	La instalación requiere de protección diferencial y magnetotérmica	Conexión del VE a la red de CA utilizando tomas de corriente normalizadas
Modo 2	No	Lenta en CA	32 A por fase (3,7 kW - 22 kW)	La instalación requiere de protección diferencial y magnetotérmica	Cable especial con dispositivo electrónico intermedio con función de piloto de control y protecciones
Modo 3	Sí	Lenta o semi-rápida Monofásica o trifásica	Según conector utilizado	Incluidas en la infraestructura especial para VE	Conexión del VE a la red de alimentación de CA utilizando un equipo específico (SAVE)
Modo 4	Sí	En CC	Según cargador	Instaladas en la infraestructura	Conexión del VE utilizando un cargador externo fijo

**Figura 2.5:** Modes de càrrega contemplats per la IEC - 61851-1.  
Font: Circuitor (2013)



## 2.3 Mobilitat urbana

Conèixer les tendències de mobilitat dels usuaris és molt important des del punt de vista institucional, ja que permet analitzar l'evolució al llarg dels anys i avaluar el bon funcionament de les polítiques associades a la mobilitat, com el transport públic, o observar tendències en certs grups poblacionals. El sistema general per fer aquest tipus d'avaluacions és mitjançant enquestes que permetin recollir informació de la quantitat de desplaçaments, el mode de transport, la distància mitjana recorreguda i els motius de desplaçament, entre d'altres.

Per la dimensió que tenen aquests estudis a nivell nacional, i la complexitat de tractar les dades, no es desenvolupen de manera anual. En canvi, a nivell urbà, i en zones amb una elevada densitat de població, com àrees metropolitanes, sí que es poden trobar publicacions més recents. En l'informe de Violland (2011) hi ha publicat un annex amb un recull de les institucions de cada país que realitzen aquest tipus d'enquestes, amb les dates de publicació, la metodologia utilitzada i les principals conclusions del document.

Per a l'abast d'aquest treball és interessant utilitzar les dades relacionades a la mobilitat amb vehicle privat, i veure quines són les tendències que segueixen aquest grup d'usuaris. Alguns autors (ElBanhawy et al. 2012) comenten que les dades de distància recorreguda i localització del vehicle elèctric en el moment de càrrega són una de les parts més importants del model, ja que determinarà l'energia demandada pel vehicle i el punt en el que es produirà la càrrega. El fet que s'utilitzin distàncies mitjanes extretes dels resultats de les enquestes, desvirtuen la complexitat que el model hauria de tenir. D'altra banda, seria important saber on i com es farà la càrrega dels vehicles estacionats, tenint en compte que, a curt termini, no hi haurà un sortidor a cada plaça d'aparcament. Això vol dir que les localitzacions de càrrega dels vehicles elèctrics estaran concentrades en un punt determinat que permeti la recàrrega dels vehicles (Green, Wang i Alam 2011; Gao et al. 2011).

Per tant, les dades de la mobilitat dels usuaris, les seves tendències horàries, juntament amb les característiques dels punts de càrrega, potència i energia a subministrar i l'estratègia de càrrega seran elements claus en el resultat de la simulació.

## 2.4 Simulació basada en agents

Els sistemes de simulació basada en agents són mètodes relativament nous d'afrontar problemes de gran complexitat integrats per unitats autònomes (C. Macal i M. North 2010). Aquest tipus d'anàlisis tenen una gran varietat d'aplicacions que requereixen emular sistemes subjectes a canvis, en els que els mètodes de simulació convencionals són incapaces de recrear les dinàmiques reals. Un nom similar que se li dona a aquest mètode és el de micro simulació, fent referència a la importància que té la interacció i el comportament autònom de cadascuna de les unitats bàsiques (Bonabeau 2002). Altres noms amb els que es pot trobar en la literatura anglesa són *Agent-based modeling* (ABM), *Agent-based simulation*

(ABS), *Individual-based modeling* (IBM) i *bottom-up modeling*.

Enfront d'altres sistemes de simulació, la principal diferència rau en el fet que es defineix el comportament a un nivell individual i, en conseqüència, el comportament global emergeix com a resultat de la interacció entre tots ells (Borshchev i Filippov 2004). Cada una d'aquestes unitats (o individu) rep el nom d'agent, i es pot definir com una entitat discreta amb els seus propis comportaments i objectius (C. M. Macal i M. J. North 2006), que interacciona amb l'entorn percebent uns canvis com a sensor i actuant com a actuator (Chen i Wang 2012). S'entén que cadascun dels agents voldrà assolir el seu objectiu basant-se en una pauta de comportament estipulada pel programador de l'escenari, però en cap cas l'agent deixarà de ser una entitat amb flexibilitat d'acció autònoma dinàmica sense predicció (Luck et al. 2005).

En aquest treball s'ha decidit implementar una simulació basada en agents pel fet que s'ha utilitzat en els darrers anys en estudis similars, i perquè permet representar d'una manera eficaç tendències de mobilitat dels diferents grups d'usuaris (ElBanhawy et al. 2012). Es pot entendre que per aquest cas els agents seran els vehicles elèctrics que interactuaran amb l'entorn (xarxa elèctrica), depenent de quins siguin els seus atributs (estat de càrrega i perfil de mobilitat).

#### 2.4.1 *Característiques dels agents*

L'autonomia és possiblement el més essencial en aquest àmbit, però no és la única característica a destacar de l'agent. Per exemple, C. Macal i M. North (2010) i Jennings (2000) fan referència a l'estat de l'agent, la capacitat d'adaptació, o l'heterogeneïtat. El primer determina la seva situació, que és variable en el temps, i consisteix en un conjunt o subconjunt d'atributs, els quals condicionaran el seu comportament, i el de tots ells conformarà l'estat global del model. La capacitat d'adaptació de l'agent es tradueix per la facilitat que té per aprendre i retenir les experiències anteriors, i modificar el seu comportament en funció d'aquests paràmetres. Alguns mètodes avançats inclouen xarxes neuronals, algorismes evolutius, o altres tècniques d'aprenentatge, que augmenten la robustesa del model depenent de l'àmbit en el qual es treballa (Bonabeau 2002). Finalment, l'heterogeneïtat dels agents permet representar tota la diversitat existent en una població, enfront de la homogeneïtat que s'utilitza en altres mètodes i que suposa un menor grau d'aprofundiment o de similitud amb la realitat.

Pel nostre model, l'estat dels usuaris vindrà determinat per les variables corresponents a la bateria (estat de càrrega, número de cicles, envelliment, etc.), i el perfil de moviment. Aquest és aleatori en cada simulació per garantir una major heterogeneïtat, però garantint en tot moment que el global dels usuaris s'ajusta a les dades d'entrada. No s'han implementat tècniques d'aprenentatge, ja que no es tracta de descriure un model evolutiu i tampoc es té com a objectiu obtenir estratègies òptimes de càrrega.

# CAPÍTOL 3:

## MODELITZACIÓ DE LA

## MOBILITAT DELS

## USUARIS

En aquest capítol es detallen els elements de la mobilitat que s'han tingut en compte per a la modalització. S'analitzarà l'escenari escollit i les dades d'entrada del model, referents a desplaçaments i temporalitat. El model es basa en el mètode utilitzat en Olivella (2012).

### 3.1 Dades bàsiques de la mobilitat

Aquest treball s'ha limitat a l'estudi de les tendències de mobilitat dels residents a la ciutat de Barcelona. Les dades utilitzades han estat les de l'Enquesta de Mobilitat Quotidiana realitzada per l'Autoritat del Transport Metropolità (2006). Tot hi haver-hi enquestes més recents, referents a les tendències de mobilitat a la Regió Metropolitana de Barcelona (RMB) (Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona 2012), no s'ofereix la mateixa quantitat d'informació que la de 2006 que és a escala autonòmica, i es realitza cada 6 anys. També s'ha decidit que les dades del cens de vehicles siguin les referents al 2006, per tal de mantenir la coherència en l'origen de les dades (Departament d'Estadística 2007).

El 2006 es produïen 15.801.351 de viatges diàriament a la RMB, dels quals un 35,8% es feien en transport privat, el que equival a uns 5,7 milions de desplaçaments. En la Taula 3.1, es mostren els valors corresponents a la distribució dels dos tipus de vehicles considerats, turismes i motos, en funció del tipus de desplaçament. També es mostra el nombre de desplaçaments, i l'índex d'auto-contençió, que és el percentatge de viatges que tenen inici i final a la mateixa zona, sense sortir-ne.

**Taula 3.1:** Desplaçaments diaris en transport privat i tipus de vehicles.  
Font: Autoritat del Transport Metropolità (2006)

Zona d'estudi	Tipus de vehicle (%)				Autocontenció (%)	Desplaçaments
	Intramunicipal		Intermunicipal			
	Cotxe	Moto	Cotxe	Moto		
Barcelona	59,9	38	70	27,7	67,5	1.138.234
1a Corona Metrop.	91,2	6,9	88,5	8,4	57,2	1.193.425
Resta RMB	92,4	5,5	92,1	5,4	81,4	3.332.593
Total	–	–	–	–	–	5.664.252

**Taula 3.2:** Parc de vehicles. Font: Departament d'Estadística (2007)

Zona d'estudi	Turismes	Motos	Vehicles
Barcelona	616.814	194.117	885.381
1a Corona Metrop.	583.956	115.791	850.375
Resta RMB	823.813	145.038	1.179.282

Combinant les dades de les Taules 3.1 i 3.2, s'observa una elevada utilització de motos a la ciutat de Barcelona, tant en desplaçaments intramunicipals com intermunicipals, respecte les altres àrees d'estudi. L'explicació és que els desplaçaments que es produeixen a la ciutat de Barcelona són, en la gran majoria, de molt poca distància, el que beneficia la utilització de vehicles lleugers. Aquestes dades seran importants a l'hora d'assignar quin tipus de vehicle tenen els agents del model, i quin és el seu desplaçament mitjà per viatge.

## 3.2 Motius de desplaçament

Un altre aspecte molt important a tenir en compte són els diferents motius ( $M$ ) que generen un desplaçament, desglossats en la Taula 3.3. Aquest aspecte del viatge és útil, pel fet que cadascun té una distribució temporal diferent, com demostra la Figura 3.1. Per exemple durant el matí hi ha un nombre més elevat de desplaçaments ocupacionals que a la tarda, que és el moment en el que es concentren la majoria dels desplaçaments de tornada. La simulació ajustarà els hàbits dels agents a aquesta distribució, tenint en compte que sempre s'hauran de fer dos viatges com a mínim, i no es pot produir un viatge de tornada si prèviament no s'ha efectuat el d'anada.

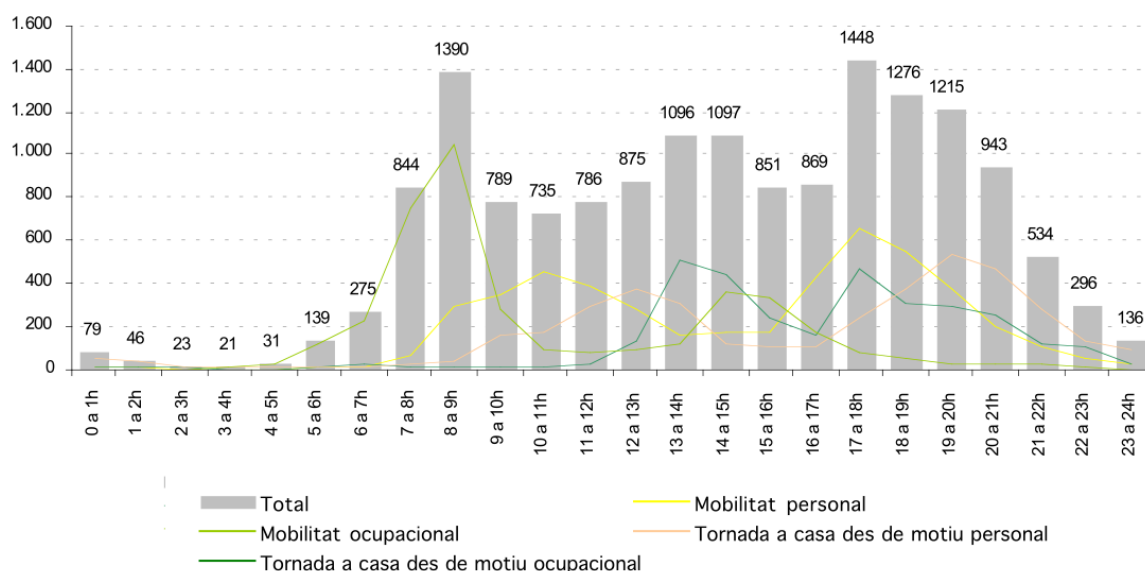
## 3.3 Desplaçaments diaris per usuari

Amb el tipus de vehicles i la distribució temporal dels viatges identificats, el següent pas és assignar una quantitat de desplaçaments diaris ( $V$ ) a cada agent.

**Taula 3.3:** Motius de desplaçament en vehicles privats.

Font: Autoritat del Transport Metropolità (2006)

Motiu	Percentatge
Ocupacional	32,3
Ocupacional tornada	24,8
Personal	23,3
Personal tornada	19,6



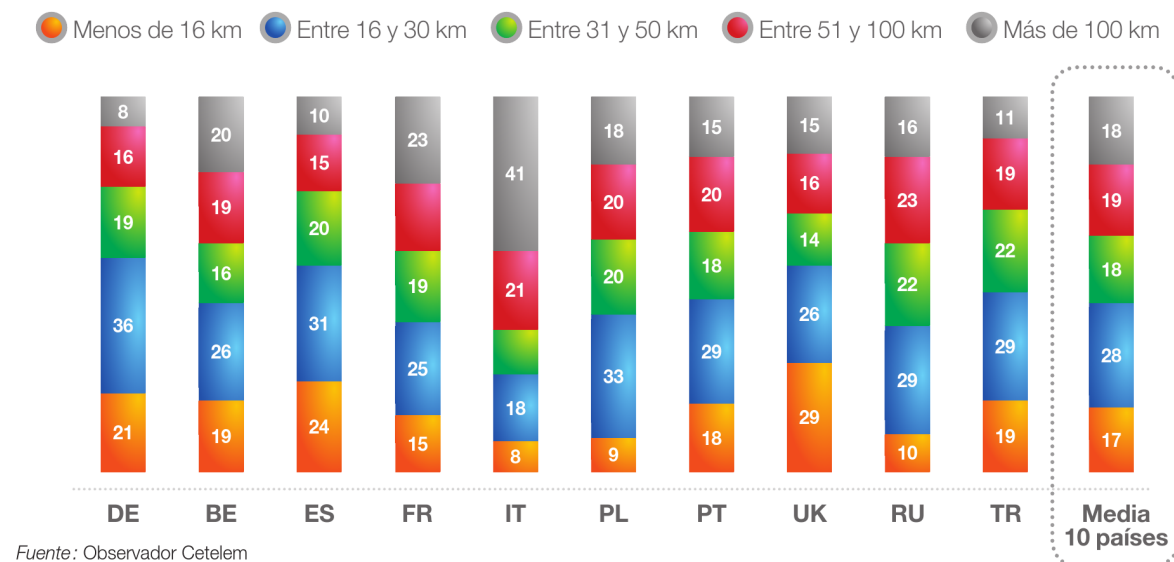
**Figura 3.1:** Distribució horària dels desplaçaments segons el motiu (en milers de desplaçaments).

Font: Autoritat del Transport Metropolità (2006)

La mobilitat és un camp d'estudi extensament treballat i estudiat com s'ha comentat en la secció 2.3. Tot i que existeixen diferents mètodes per representar la distribució de desplaçaments d'un grup d'usuaris, la distribució de Poisson ofereix uns resultats satisfactoris per a les nostres necessitats. L'inconvenient principal que contempla Xu (2010) és la poca fidelitat amb la que representa els usuaris amb una quantitat elevada de desplaçaments. La distribució expressa la probabilitat d'un nombre determinat d'esdeveniments en un interval de temps, donada una variació mitjana i independent de l'última ocurrència. El valor resultant haurà de ser superior a 2, ja que és el mínim de viatges per produir-se un desplaçament d'anada i un altre de tornada, i inferior a 7, perquè és el valor que l'EMQ considera com a viatges per motius professionals.

### 3.3.1 Distància per desplaçament

En estudis similars, en els que és necessari elaborar un model de mobilitat per avaluar l'impacte del vehicle elèctric en xarxa, sovint s'agafa com a referència la distància diària mitjana per usuari. L'any 2006 el valor en el conjunt d'Espanya era de 34,2 km al dia per als vehicles d'ús privat, tot i que és perfectament extrapolable a la ciutat de Barcelona (Pallisé et al. 2010). Tot i així, alguns autors afirmen que agafar un únic valor de referència per a tot el global d'agents no és suficient per obtenir una bona mostra (Green, Wang i Alam 2011; ElBanhawy et al. 2012). Per això s'utilitzen les dades de l'Observatori Cetelem en el seu estudi del 2012 sobre el vehicle elèctric (Cetelem 2012), en el que es fa una comparativa dels recorreguts diaris amb vehicle privat en diferents països, com es mostra en la Figura 3.2. Encara que els valors d'aquest estudi engloben el conjunt d'Espanya, es considera que és aplicable al cas estudiat.



**Figura 3.2:** Quilometratge recorregut en un dia normal entre setmana.  
Només vehicles d'ús personal. (en %)  
Font: Cetelem (2012)

D'altra banda també es disposa de dades actuals d'un projecte, dirigit per diverses empreses, anomenat *The EV Project*, i que compta amb el suport del U.S. Department of Energy. Aquest projecte permet als usuaris de vehicles elèctrics,

residents als Estats Units, enviar informació referent a la seva mobilitat, amb dades que inclouen, la quantitat de desplaçaments i el seu recorregut o el temps de càrrega, juntament amb el mode que s'ha utilitzat (Figura 2.5), entre altres. L'aspecte més destacat és que ofereix informació de la mobilitat d'usuaris amb vehicle elèctric, un tipus d'informació molt valuosa, ja que permet avaluar si hi ha canvis en els hàbits de mobilitat com a conseqüència de l'autonomia de la bateria.

**Taula 3.4:** Dades de mobilitat pels usuaris del Nissan Leaf i el Chevy Volt. Font: ECotality (2013)

<b>Nissan Leaf</b>	Q2 2013	Q1 2013	Q4 2012	Q3 2012	Q2 2012
Nombre de vehicles	4.261	4.240	3.762	3.200	2.911
Dist. mitja per despl. (km)	11,4	11,3	11,1	11,6	11,6
Despl. entre càrrega	3,8	3,7	3,8	3,9	3,9
Dist. entre càrrega (km)	42,9	41,7	42,3	44,9	45,2
Quantitat de despl.	1.135.053	1.075.251	969.853	813.430	787.895
Despl. per vehicle	266,4	253,6	257,8	254,2	270,6
Despl. per dia	2,9	2,8	2,8	2,8	3
Dist. per dia (km)	33,8	32,1	31,4	32,3	34,9
<b>Chevrolet Volt</b>	Q2 2013	Q1 2013	Q4 2012	Q3 2012	Q2 2012
Nombre de vehicles	1.895	1.766	1.021	809	408
Dist. mitja per despl. (km)	13,3	13,2	13	13,3	12,9
Despl. entre càrrega	3,3	3,4	3,5	3,5	3,2
Dist. entre càrrega (km)	44,4	44,9	45,4	47,1	41,8
Quantitat de despl.	676.414	526.156	369.118	286.682	147.886
Despl. per vehicle	356,9	297,9	361,5	354,4	362,5
Despl. per dia	3,9	3,3	3,9	3,89	4
Dist. per dia (km)	53	44,2	51,7	51,9	51,9

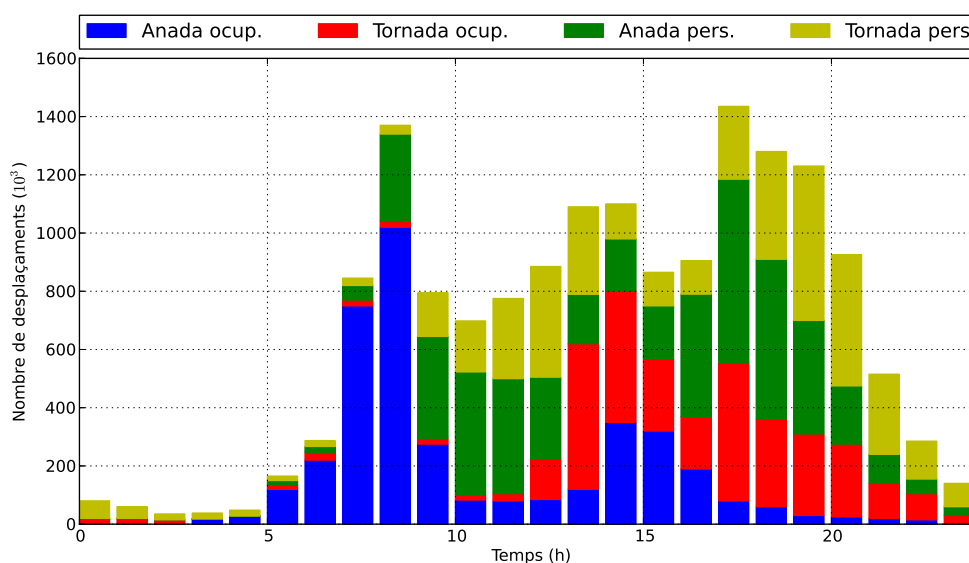
Una de les conclusions que es poden extreure de les dades de la Taula 3.4 és que les diferents arquitectures de vehicle mostren una diferenciació en la distància diària. El Chevrolet Volt és un vehicle híbrid en sèrie amb una bateria de 16 kWh, mentre que el Nissan Leaf és un elèctric pur amb una bateria de 24 kWh. Tot i així, el motor de combustió li dona una major autonomia al Volt, pel que els seus usuaris podran fer més desplaçaments i de major distància. Aquests valors podran utilitzar-se com a referència en l'anàlisi del perfil de mobilitat dels agents.

Aquests matisos es tindran en compte en l'assignació del tipus de vehicle a cada agent, que serà el mateix durant tota la simulació. A més, es valorarà que els viatges de tipus intramunicipal seran de menor distància que els intermunicipals.

### 3.4 Distribució temporal

Cada desplaçament té associat un temps determinat, que varia en funció de la distància a recórrer, i la velocitat mitjana del vehicle durant el desplaçament. Aquesta velocitat serà a la vegada depenent del tipus de desplaçament, intramunicipal o intermunicipal. Al elaborar la distribució temporal de cada usuari s'han de respectar certs criteris per tal de que el model mantingui la coherència. D'una banda els desplaçaments que tinguin associats motius de tornada, tant ocupacional com personal, s'hauran de produir una vegada tots els desplaçaments d'anada respectius ja s'hagin complert. Per establir un ordre en tot l'espectre horari s'han diferenciat 3 torns en els quals s'ha donat als viatges ocupacionals una preferència major que als personals. D'una banda, els desplaçaments de motiu ocupacional suposen un percentatge superior als personals, com mostra la Taula 3.3 i, de l'altra, els personals tenen una distribució horària al llarg de tot el dia que els fa més flexibles, com mostra la Figura 3.3.

En el primer torn els usuaris efectuaran els desplaçaments ocupacionals durant la primera part del dia i els personals durant la segona, mentre que en el segon torn la distribució serà a la inversa. En el cas del tercer, els viatges tant ocupacionals com personals estaran distribuïts durant tot el dia.



**Figura 3.3:** Distribució horària dels desplaçaments segons el motiu.

Font: Autoritat del Transport Metropolità (2006)



# CAPÍTOL 4:

# MODELITZACIÓ DE LES

# BATERIES

El mètode de càrrega de les bateries determinarà la manera de sol·licitar l'energia de la xarxa. La recerca en la correcta modelització de les bateries és extensa, sobretot en la manera d'extreure models matemàtics que permetin simular-ne el comportament.

En aquest capítol s'ha definit el perfil de tensió de la bateria, l'estratègia de càrrega i l'algorisme d'envelliment.

## 4.1 Càrrega de les bateries d'ió liti

En moltes aplicacions el mètode més senzill per saber el nivell de càrrega d'una bateria és mesurant-ne el voltatge en circuit obert. A través d'una taula de valors preestablerta, el càlcul de la capacitat disponible és directe. Malauradament, aquest mètode es veu afectat per les condicions de temperatura ambientals i pot indicar valors erronis. Per això s'utilitzen altres mètodes paral·lels per complementar els càlculs, com els que es basen en la integració del corrent que travessa els terminals de la bateria. Tot i així també s'han de preveure els canvis de temperatura i eficiències variables dels components si es vol una major precisió.

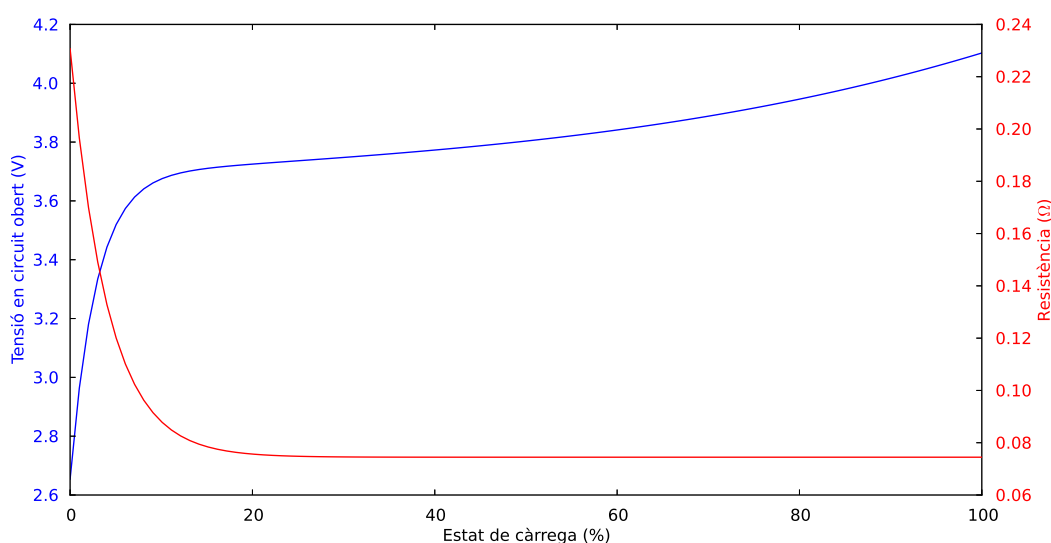
En el model elaborat no es tenen en compte els efectes de la temperatura en les bateries, pel que fa al procés de càrrega. En alguns sistemes de gestió una temperatura elevada pot ser suficient per reduir el corrent de càrrega o aturar el procediment per complet. Modelitzar el comportament tèrmic durant el procés de càrrega de la bateria queda fora de l'abast d'aquest projecte, pel que el sistema d'equacions desenvolupat per Chen i Rincon-Mora (2006) s'adequa a les necessitats del model. D'aquesta manera és possible elaborar un perfil de càrrega per agent i obtenir la repercussió en xarxa.

L'estat de càrrega es calcularà respecte l'energia disponible en la bateria. Això

implica una linealització de la corba de tensió i, per tant, una simplificació del model. L'avantatge principal de les equacions 4.1 i 4.2 és que proporcionen el perfil de tensió de la cel·la a partir de l'estat de càrrega, obtingut amb el mètode descrit. Amb aquests valors es podrà adequar el corrent en funció d'una potència màxima de càrrega. En la Figura 4.1 es representen els perfils de les equacions en funció de l'estat de càrrega.

$$V_{oc}(SoC) = -1,031 \cdot \exp^{-35 \cdot SoC} + 3,685 + 0,2156 \cdot SoC - 0,1178 \cdot SoC^2 + 0,3201 \cdot SoC^3 \quad (4.1)$$

$$R_{Series}(SoC) = 0,1562 \cdot \exp^{-24,37 \cdot SoC} + 0,07446 \quad (4.2)$$



**Figura 4.1:** Perfil de la bateria amb les equacions 4.1 i 4.2.

Amb el perfil de la bateria determinat, el següent pas és elaborar l'algorisme que controla el procés de càrrega. L'estratègia adoptada és una de les presentades en l'article de Marra et al. (2012) que, en comptes de carregar la bateria utilitzant l'estratègia de corrent constant (CC) i tensió constant (CV), s'opta per una zona de potència constant (CP) i una altra de tensió constant (CV). S'ha decidit escollir aquest mètode perquè limita la potència màxima durant tot el procés, i no es produeix un pic de potència en el moment de transició entre les dues fases, com s'aprecia a la Figura 4.2b. En l'article, aquest increment és del 11,4% respecte la potència inicial de 3,7 kW amb un rendiment del convertidor del 88%.

Amb el sistema CPCV, el valor del corrent és funció de la tensió, i ve determinat pel resultat de l'equació 4.3, ja que el factor limitant és la potència. Per exemple, si tenim una connexió domèstica limitada a 3,7 kW (16 A i 230 V), i s'utilitza el mètode CCCV, el valor de la potència inicial serà inferior al màxim, ja que el pic haurà de coincidir amb el màxim de la línia. En els casos en els que la potència de la línia excedeix la potència màxima de càrrega de la bateria, el mètode CCCV és més convenient, ja que el pic no suposarà una limitació. Tot i que la diferència temporal és pràcticament nul·la, el mètode CPCV ofereix avantatges si es vol

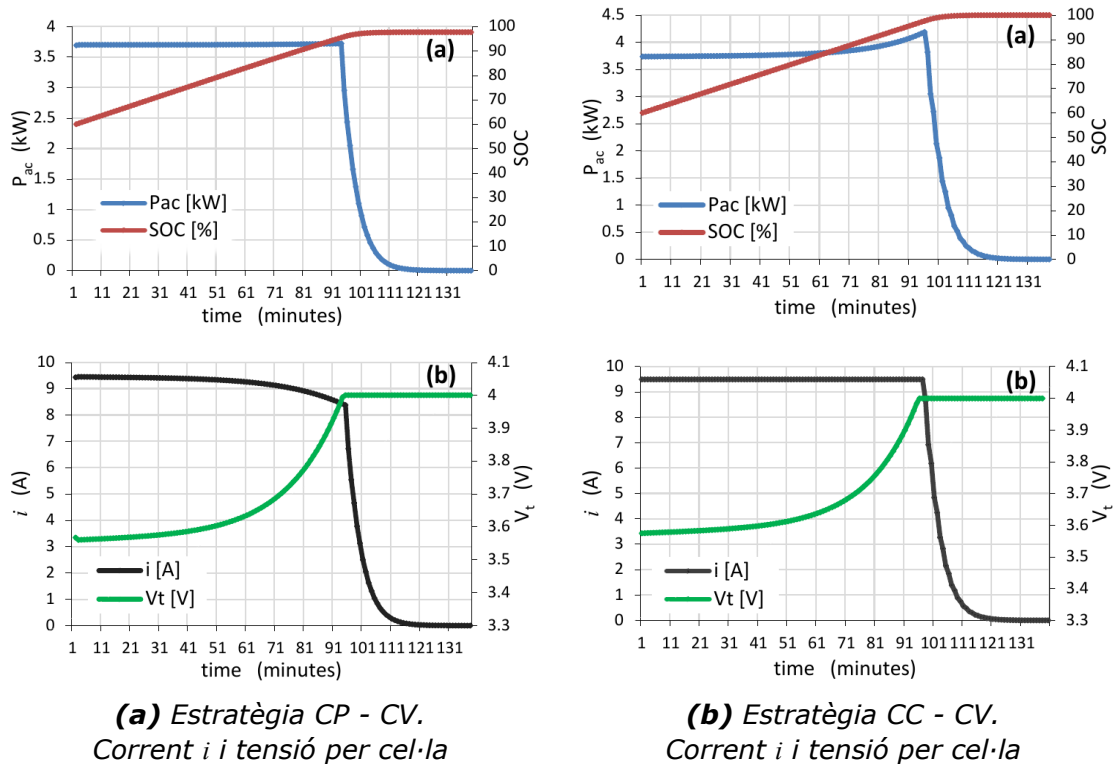
imposar una potència màxima variable en el temps, o si es vol treballar amb sistemes intel·ligents de gestió de càrregues (SIG).

En la Figura 4.2 es representen les dues modalitats de càrrega amb els valors del corrent de la bateria i la tensió de cel·la d'una bateria de 14 kWh.

$$i(\text{SoC}) = \eta \cdot \frac{V_c \cdot i_c}{V_{\text{pack}}(\text{SoC})} \quad (4.3)$$

On:

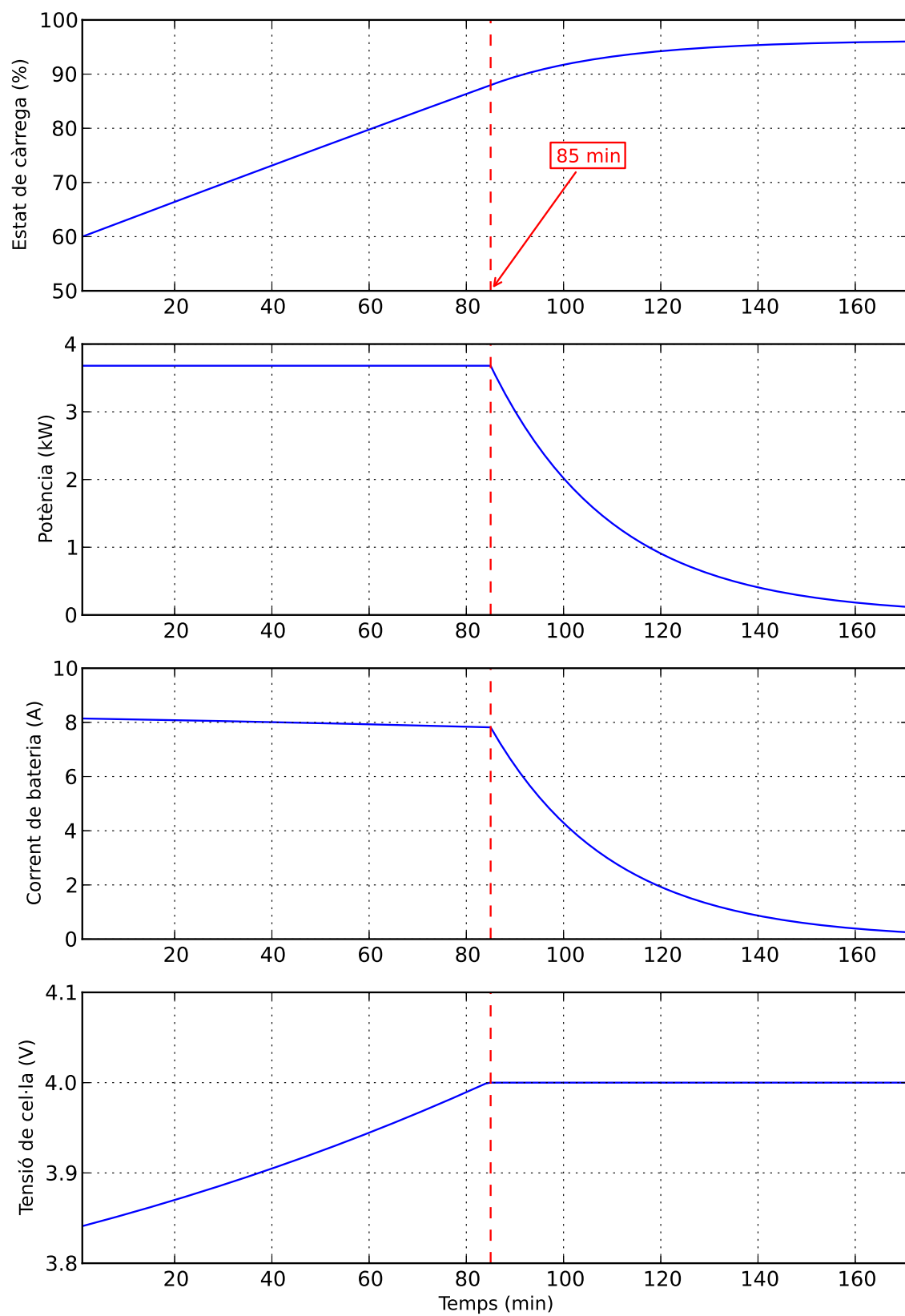
- $V_c$  és la tensió de xarxa
- $i_c$  és el corrent de xarxa
- $V_{\text{pack}}$  és la tensió de la bateria
- $\eta$  és el rendiment del convertidor
- $i$  és el corrent de la bateria



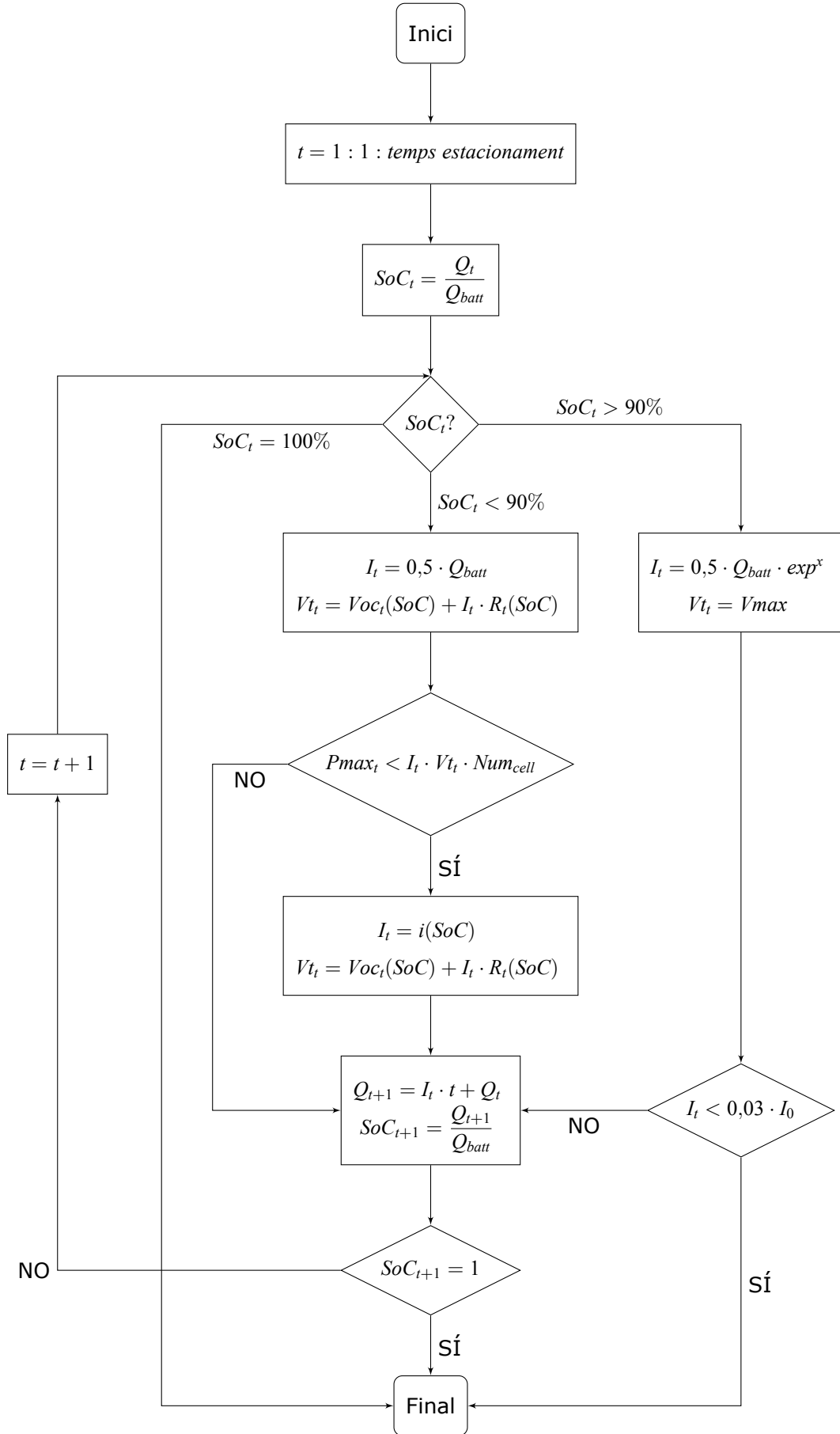
**Figura 4.2:** Estratègies de càrrega per una bateria de 14 kWh.

Font: Marra et al. (2012)

En la Figura 4.3 es mostra el procés de càrrega, amb el mètode CP - CV, d'una bateria en les mateixes condicions que en l'exemple de Marra et al. (2012). Es pot concloure que el temps de càrrega fins al 90% de capacitat és prou similar, 85 minuts en la simulació i 96 minuts en la publicació, però posteriorment, el pendent de la zona exponencial és superior en l'exemple, el que genera una càrrega més lenta. Aquestes diferències es poden atribuir al fet que la corba de la tensió per cel·la, extreta de l'article de Chen i Rincon-Mora (2006), no és exactament igual que la de Marra et al. (2012), ja que té un perfil més pla, el que porta a petites variacions. El diagrama de flux de la Figura 4.4 mostra els passos de l'algorisme de càrrega, durant l'estona en el que el vehicle està estacionat.



**Figura 4.3:** Corbes del procés de càrrega d'una bateria d'ió liti amb un SoC inicial del 60%.



**Figura 4.4:** Diagrama del procés de càrrega de la bateria d'ió liti.

## 4.2 Model d'envelliment de les bateries

El model escollit per replicar el procés d'envelliment de les bateries és el proposat per Millner (2010). Aquest model es basa en el fet que els diferents fenòmens, que afecten la degradació de la bateria, poden descriure's amb sistemes de fractura mecànica. Les variables que governen el sistema són l'estrès i la temperatura, que afecta la bateria durant el seu envelliment actiu i passiu. La variable de sortida del model és  $L$ , que té un rang de 0 a 1 des de que la cel·la és nova, i té tota la càrrega disponible, fins que queda inservible i no és possible carregar-la. Com s'ha comentat en la secció 2.2.3, el final de la vida útil és en el 80% de la càrrega inicial, el que suposa un factor  $L$  de 0,2.

El sistema de Zhurkov assumeix que la degradació és un fenomen tèrmic, i que està determinat per un estrès extern i un estrès tèrmic amb una energia d'activació llindar. Explicant el mecanisme de propagació de clivells en estructures sòlides, Zhurkov mostra una bona correlació entre les dades experimentals i la seva fórmula, pel temps ( $t$ ) de fractura de materials:

$$t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - gS}{kT}\right) \quad (4.4)$$

Reorganitzant els termes de l'equació per representar la taxa de propagació inversament proporcional a  $t$ :

$$\frac{t_0}{t} = \exp\left(\frac{gS - U_0}{kT}\right) = \exp\left(\frac{-U_0}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{gS}{kT}\right) \quad (4.5)$$

El resultat mostra que el primer terme, que reflecteix l'envelliment passiu, és proporcional a l'increment de la temperatura ( $T$ ). Aquest fet correspon a la relació d'Arrhenius, i s'utilitza en molts models de bateries (Liaw et al. 2003). Les dades dels fabricants mostren una degradació fins a dos vegades superior per cada 10 °C de diferència.

L'equació de Zhurkov (4.4) indica que la taxa augmenta de manera exponencial al nivell d'estrès  $S$ , que està relacionat al *swing* de la bateria, és a dir, a la profunditat de la descàrrega. Per simplificar el concepte, es separa l'efecte de l'estat de càrrega del de l'estrès provocat pel *swing*. Per això introduïm la variable  $SoC_{avg}$  (4.6), que representa el valor mig de l'estat de càrrega durant l'interval de temps estudiat, i la variable  $SoC_{dev}$  (4.7), que representa la desviació de l'estat de càrrega respecte la seva mitjana al llarg del període.

$$SoC_{avg} = \frac{\int_{time\ m} SoC(t) dt}{t} \quad (4.6)$$

$$SoC_{dev} = 2\sqrt{3 \cdot \frac{\int_{time\ m} (SoC(t) - SoC_{avg})^2 dt}{\int_{total\ time} dt}} \quad (4.7)$$

Per incloure múltiples càrregues i descàrregues en el període considerat, el nombre de cicles  $N$  efectuats ve donat per l'equació 4.8, on  $Q_{nom}$  és la capacitat no-

minal de la bateria i  $I(t)$  és el valor absolut del corrent de la bateria en el temps  $t$ . Un factor de 2 és necessari, ja que es tenen en compte els corrents de càrrega i descàrrega.

$$N = \frac{\int_{total} |I(t)| dt}{\frac{Q_{nom}}{2}} \quad (4.8)$$

A continuació ja es pot saber la variació del paràmetre  $Life1$  a partir de  $SoC_{avg}$ ,  $SoC_{dev}$  i la temperatura. Tot i així, també són necessaris valors específics de les bateries,  $K_{co} = 3,66 \cdot 10^{-5}$ ,  $K_{ex} = 0,717$  i  $K_{SoC} = 0,916$ , que s'extreuen de l'estudi de Peterson, Apt i Whitacre (2010) referent a la bateria A123 ANR26650M1A (Millner 2010). En aquest estudi es sotmeten bateries, de capacitat similar a les utilitzades en vehicles elèctrics, a diferents règims de càrrega i descàrrega, utilitzant perfils de conducció estandarditzats.

$$Life1 = K_{co} \cdot N \cdot \exp\left(\frac{(SoC_{dev} - 1) \cdot T_{nabs}}{K_{ex} \cdot T_a}\right) + 0,2 \cdot \frac{t_{cycle}}{t_{life}} \quad (4.9)$$

El valor de  $t_{life}$  correspon al temps que tarda la bateria a arribar al 80% de la càrrega inicial per envelliment passiu. Posteriorment, la degradació s'ajusta per comptabilitzar el  $SoC_{avg}$ , de manera que la velocitat de degradació és proporcional a la concentració dels ions de liti:

$$Life2 = Life1 \cdot \exp\left(\frac{K_{SoC} \cdot (SoC_{avg} - 0,5)}{0,25}\right) \cdot (1 - L) \quad (4.10)$$

Finalment s'ajusta el model per la temperatura, obtenint el paràmetre  $L$  per cada cicle  $m$ :

$$Life(m) = Life2 \cdot \exp\left(\frac{T_{fact} \cdot (T - T_{nom}) \cdot T_{nabs}}{T_a}\right) \quad (4.11)$$

L'envelliment al llarg de la vida de la bateria per  $M$  intervals de temps o viatges és el següent:

$$L = \sum_{m=1}^M Life(m) \quad (4.12)$$

#### 4.2.1 Model d'envelliment passiu

Durant les hores d'inactivitat el model de degradació només està condicionat per la temperatura i el temps, de manera que vindrà determinat per:

$$Life1_{id} = 0,2 \cdot \frac{t_{cycle1}}{t_{life}} \quad (4.13)$$

$$Life_{idle} = Life_{1id} \cdot \exp\left(\frac{T_{fact} \cdot (T - T_{nom}) \cdot T_{nabs}}{T_a}\right) \quad (4.14)$$

#### 4.2.2 Model d'envelliment actiu

Durant les hores d'activitat, corresponents als viatges o als períodes de càrrega, la degradació ve determinada pel temps, la profunditat dels cicles de la bateria ( $SoC_{dev}$ ,  $SoC_{avg}$  i  $N$ ) i la temperatura, ambient ( $T_a$ ) i de la bateria ( $T$ ), pel que la formulació serà la següent:

$$Life_{1nonid} = 0,2 \cdot \frac{t_{cycle2}}{t_{life}} \quad (4.15)$$

$$Life_{2nonid} = K_{co} \cdot N \cdot \exp\left(\frac{(SoC_{dev} - 1) \cdot T_{nabs}}{K_{ex} \cdot T_a}\right) + Life_{1nonid} \quad (4.16)$$

$$Life_{3nonid} = Life_{2nonid} \cdot \exp\left(\frac{K_{SoC} \cdot (SoC_{avg} - 0,5)}{0,25}\right) \cdot (1 - L) \quad (4.17)$$

$$Life_{nonid} = Life_{3nonid} \cdot \exp\left(\frac{T_{fact} \cdot (T - T_{nom}) \cdot T_{nabs}}{T_a}\right) \quad (4.18)$$

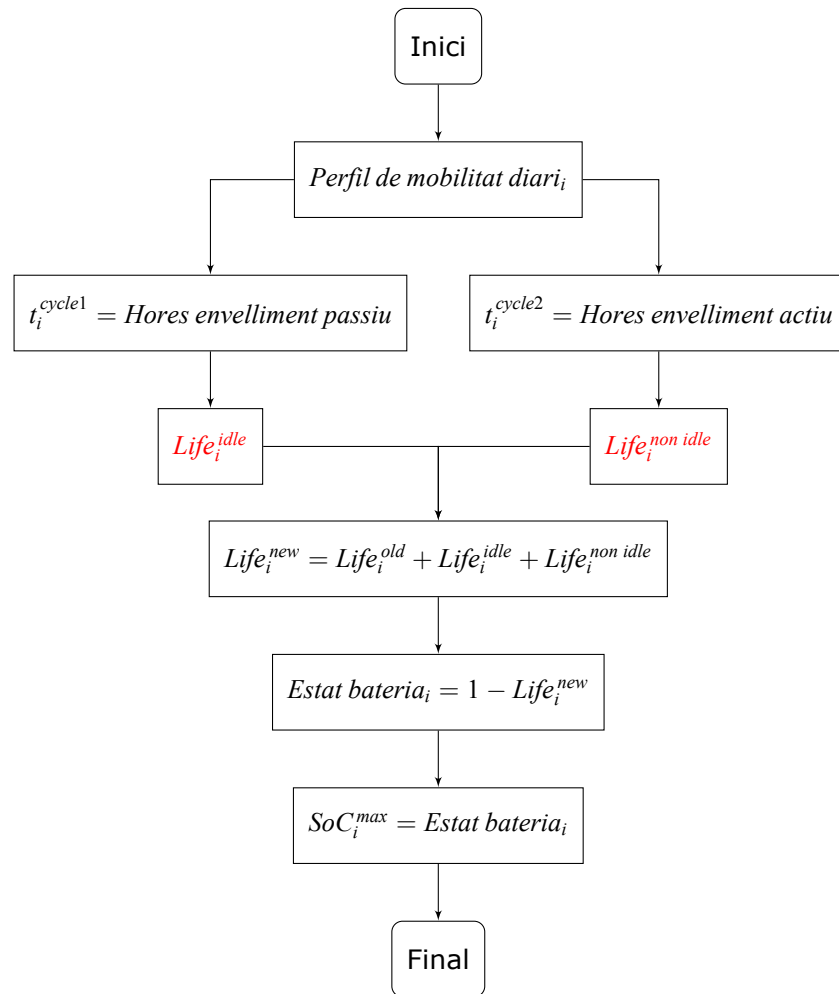
#### 4.2.3 Envelliment acumulat

El valor final de la degradació és la suma de l'envelliment passiu i l'actiu amb la degradació acumulada prèviament:

$$Life_{new} = Life_{old} + Life_{idle} + Life_{non idle} \quad (4.19)$$

En la Figura 4.5 es representa la implementació de les diferents modalitats d'envelliment que s'han avaluat.





**Figura 4.5:** Diagrama del procés d'envelliment de la bateria d'ió liti.  
Font: Elaboració pròpia.



# CAPÍTOL 5:

## MODEL PROPOSAT I

### ABAST

Havent analitzat amb detall els mòduls principals, a continuació s'explica l'estructura global del model i quins són els escenaris de càrrega que es pretenen avaluar.

#### 5.1 Escenaris de càrrega

S'ha decidit analitzar tres escenaris diferents de càrrega, per tal de comparar les diferències en el perfil en xarxa. D'alguna manera, s'ha intentat emular unes condicions econòmiques reals, en les que carregar a casa sempre és més econòmic. Actualment, a Barcelona es disposa d'unes 250 estacions de càrrega lenta (LIVE Barcelona 2013), tot i que les previsions pel 2014 eren de 4400 punts de càrrega lenta i 20 de càrrega ràpida (IEA 2012). En moltes d'aquestes estacions públiques es permet la recàrrega del vehicle de manera gratuïta, com a política per impulsar la penetració del vehicle elèctric en el parc automobilístic. Tot i així, es preveu que en un futur la càrrega de vehicles en pàrquings privats i estacionaments públics formi part d'un nou model de negoci (Román et al. 2011).

##### 5.1.1 Cas 1: Càrrega al final del dia

La càrrega al final del dia es refereix a la preferència de l'usuari a carregar el vehicle, un cop s'ha finalitzat l'últim desplaçament. Això vol dir que la majoria dels usuaris intentaran arribar a casa per fer una sola càrrega diària. L'objectiu és avaluar si els valors actuals d'autonomia elèctrica són suficients per realitzar tots els desplaçaments diaris realitzant una sola càrrega nocturna. També és interessant analitzar l'evolució de l'envelliment, ja que es produiran càrregues amb un *swing* elevat.

### 5.1.2 Cas 2: Càrrega al final del dia amb suport entre desplaçaments

Aquest escenari serà similar a l'anterior, tot i que es permetrà la càrrega entre desplaçaments, a més de la nocturna. Aquesta es produirà quan l'estat de càrrega estigui per sota del mínim establert. L'objectiu és veure si hi ha una millora de en el volum de desplaçaments finalitzats amb èxit, en vehicles que no tenen prou autonomia per completar el dia en el primer escenari, i si hi ha una millora en l'envelliment de la bateria com a conseqüència de la reducció del *swing*.

### 5.1.3 Cas 3: Càrrega amb discriminació horària

En la càrrega amb discriminació horària s'intenta reproduir un escenari amb un règim econòmic del tipus *Time of Use* (ToU). Això vol dir que el comercialitzador, o l'agregador, serà capaç d'enviar senyals a l'estació de càrrega referents al preu de l'energia, pel que el client podrà beneficiar-se d'un menor cost de càrrega durant un cert període. Pel vehicle elèctric es disposa del període supervall, que és la franja horària amb menor demanda d'electricitat, i per tant la que tindrà un cost menor.

Per aquest cas, s'ha decidit que només un percentatge dels agents tingui habilitat aquest sistema, i que els altres apliquin una estratègia de càrrega sense control. Ambdós grups també tindran suport entre desplaçaments per tal de reduir el *swing* de la bateria. Aquest és un dels possibles escenaris que contemplen Green, Wang i Alam (2011) en el que, la lenta implantació d'aquests sistemes, portarà a la convivència de les dues tecnologies. Algunes de les zones d'estudi del The EV Project (ECotality 2013) mostren aquest tipus de comportament.

## 5.2 Estructura general del model

El model elaborat consta de 3 mòduls principals, que adrecen els diferents problemes de la simulació. D'una banda és necessari generar les funcions que permetin definir els hàbits de mobilitat dels agents, remarcats de color gris en la Figura 5.1. D'aquesta manera s'establiran les connexions dels diferents usuaris a la xarxa en l'escala temporal. Les dades de mobilitat han estat explicades en el capítol 3.

D'altra banda, la funció que avalua la interacció entre el vehicle i la xarxa determinarà el procés d'intercanvi d'energia. Finalment, dependent de la utilització i el nombre de connexions, es generarà una degradació de la bateria. En l'esquema de la Figura 5.1, la funció d'envelliment és la mateixa en cada cas, però la de càrrega té lleugeres modificacions en funció de l'escenari.

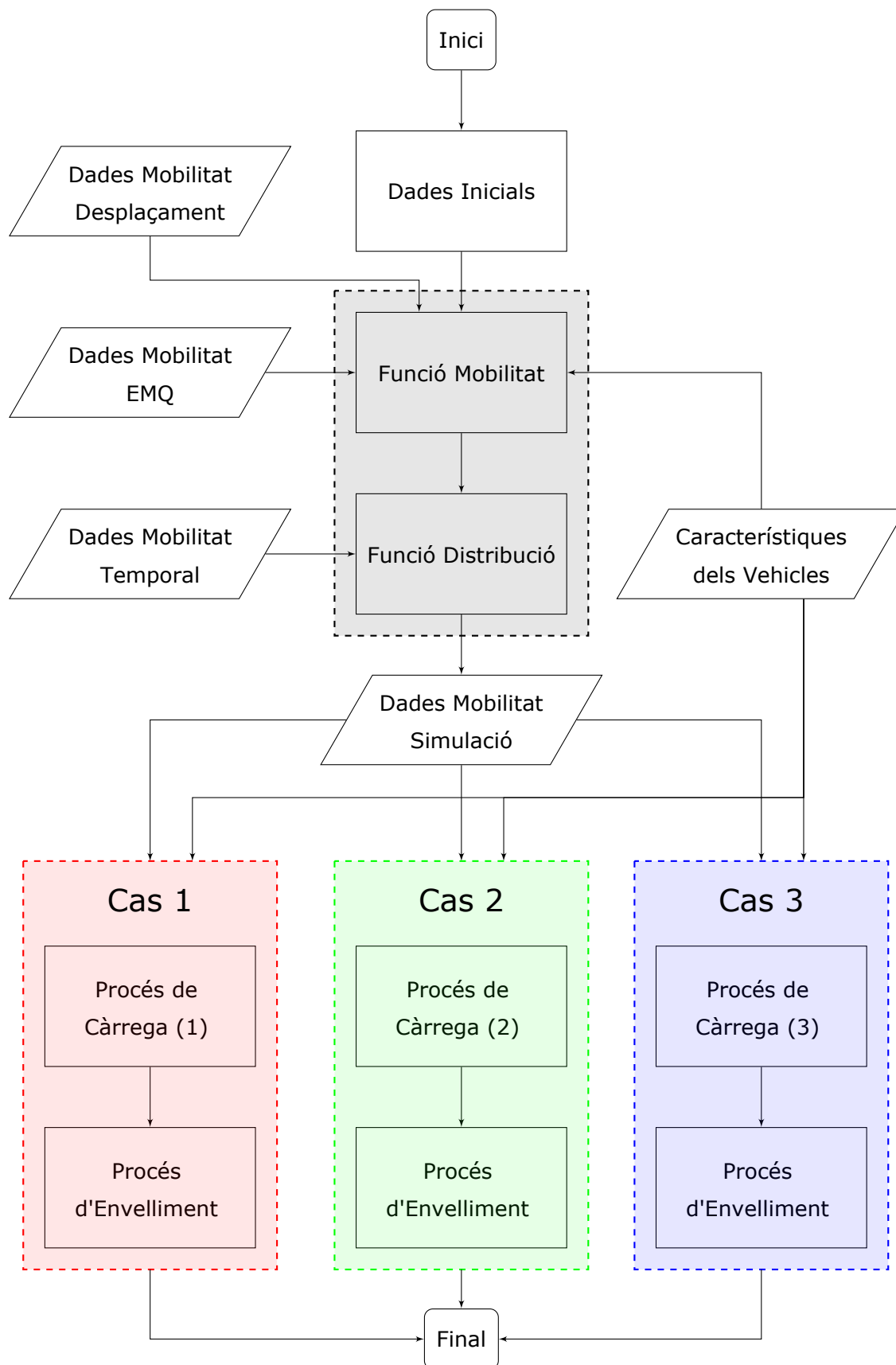
A més, el model disposa de variables globals per variar les condicions entre simulacions i que són comunes pels diferents mòduls. Aquestes variables seran la quantitat de vehicles elèctrics, la temperatura ambient i la de la bateria, el rendiment de càrrega, el percentatge de cotxes que poden carregar amb discriminació horària, i el nombre de dies a simular. Finalment, les característiques de vehicles elèctrics s'han obtingut de diferents publicacions, com e'mobile (2013)

i MOVELE (2013). Els elements considerats han estat la capacitat i el tipus de bateria, el consum elèctric del vehicle, l'arquitectura i l'autonomia elèctrica.

## 5.3 Limitacions de la simulació

En l'elaboració d'aquests tipus de model, en el que l'objectiu és crear un model semblant a la realitat, sempre hi ha detalls que, per la seva complexitat, s'han de deixar de banda. S'ha d'establir un terme mig, entre complexitat i abstracció, per tal de que el model sigui prou robust per extreure'n conclusions satisfactòries. A continuació es raona cadascuna d'aquestes simplificacions:

- **Perfil de mobilitat per a motos:** les dades utilitzades en la distància per desplaçament dels perfils de mobilitat (secció 3.3.1) estan basades específicament en vehicles, ja que són les úniques disponibles. Les diferents característiques entre un i altre mitjà de transport, juntament amb el seu àmbit d'utilització (Taula 3.1), fan difícil pensar que les distàncies de desplaçament siguin perfectament aplicables, sobretot pel que fa a recorreguts llargs. En les primeres simulacions es va veure que les motos elèctriques no podien realitzar els perfils de mobilitat diaris amb normalitat, pel que finalment es va optar per només incloure motos en els viatges intramunicipals, ja que són els més curts.
- **Afectació de la temperatura a la bateria:** la temperatura és un aspecte clau del rendiment global de la bateria en múltiples casos, com en el procés de càrrega o en la capacitat nominal. Tot i així, només se l'ha considerat en el procés de l'envelliment, per la dificultat de modelitzar-la en una circumstància tant complexa com és el procés de càrrega. D'altra banda, també s'hauria de tenir en compte en les lectures de la tensió i modificar el procés de càrrega per a qüestions de seguretat. També es podria comptabilitzar un sistema de refrigeració que consumís energia en funció de la temperatura ambient i d'operació en diferents circumstàncies.
- **Efecte d'autodescàrrega:** no s'ha tingut en compte l'autodescàrrega de la bateria durant el període de simulació, tot i que és aproximadament d'un 10% mensual (Buchmann 2001; Pallisé et al. 2010). Això vol dir que no hi haurà un mode standby en el qual un baix corrent recuperarà la caiguda de tensió ocasionada per l'autodescàrrega. No s'ha de confondre aquest procés amb la pèrdua de capacitat de la bateria, encara que les condicions que els acceleren siguin similars.
- **Frenada regenerativa:** al utilitzar les dades de consum mig per quilòmetre, no s'ha reproduït un perfil de mobilitat estandarditzat, com podria ser el NEDC, i que determina uns intervals d'acceleració, de frenada i de velocitat constant. Per això, no ha estat possible quantificar quina energia es recupera durant el viatge, mitjançant la frenada regenerativa. Com que aquesta recuperació d'energia és equivalent a una càrrega curta i amb un corrent elevat, també comporta un envelliment, que podria ser del 5% durant tota la vida útil en vehicles híbrids (Duleep et al. 2011).



**Figura 5.1:** Diagrama general de la simulació.

- **Distribució temporal de la mobilitat:** la distribució temporal s'ha fet minimitzant la necessitat d'eliminar desplaçaments. Tot i així, el mètode genera alguns perfils de mobilitat en el que el temps d'estacionament entre dos desplaçaments és molt curt. A més, si la bateria es descarrega completament enmig del desplaçament, el vehicle arribarà al seu destí, però es quantificarà com a desplaçament que no s'ha pogut efectuar.
- **Generalització de les bateries:** tot i que els vehicles que s'utilitzen en la simulació tenen diferents tipus de bateries, només s'ha reproduït el comportament de les d'ió liti, ja que són les majoritàries, i les que es preveu que la seva utilització augmenti en els pròxims anys. Tant el model d'envel·liment com l'impacte en xarxa de la bateria són diferents per a les variades tipologies químiques. Per exemple, les bateries de Ni-MH arriben a la fi de la seva vida útil molt abans que les d'ió liti, però suporten molt millor els corrents elevats, i no són tant delicades durant el procés de càrrega o la gestió tèrmica.
- **Harmònics i energia reactiva:** no s'han avaluat els efectes en la xarxa dels harmònics i l'energia reactiva com a conseqüència dels processos de càrrega. Aquestes distorsions poden provocar sobrecàrregues en el conductor neutre en els casos de càrrega monofàsica, pel que s'hauria de valorar el condicionament de les instal·lacions, ja sigui amb filtres actius o altres dispositius similars (Pallisé et al. 2010). Extrapolant a un nombre major de vehicles s'hauria de considerar la possibilitat de provocar sobrecàrregues en la xarxa, tot i que aquest és un àmbit força estudiat en els darrers anys (Clement, Haesen i Driesen 2009; Clement-Nyns, Haesen i Driesen 2010; Galus, Zima i Andersson 2010; Olivella 2012; Shao, Pipattanasomporn i Rahman 2009; Valsera-Naranjo et al. 2011, 2012).
- **Aspectes econòmics:** no s'han quantificat els aspectes econòmics referents a la càrrega de la bateria, ni s'ha establert una selecció dels vehicles respecte el seu preu. Com que no hi ha establert un preu horari de l'energia, les càrregues dels vehicles només es basen en l'estat de càrrega de la bateria, i no hi ha implementades mesures de previsió, ni incentius per carregar el mínim possible fora de les hores vall.
- **Variacions entre cel·les:** cadascuna de les cel·les presenta petites variacions energètiques, com a conseqüència del procés de fabricació. Es pot donar el cas que una cel·la tingui una resistència lleugerament inferior o superior a una altra del mateix model, però sempre dintre d'un percentatge especificat pel fabricant. Això implicarà que, energèticament, una cel·la tindrà una autodescàrrega o un rendiment de funcionament lleugerament diferents a la resta. A la llarga, si el sistema de control de la bateria (*Battery Management System* (BMS)) no ho té en consideració, pot ocasionar la sobrecàrrega de la cel·la, o una mala estimació de l'estat de càrrega. Per això el BMS haurà de ser capaç d'aplicar algorismes d'equilibri de cel·les, el que pot portar a un major temps de càrrega, o una major energia consumida, depenent de l'estratègia adoptada (Elias et al. 2003; Andrea 2008; Röblier 2008; Wen 2009; Bergveld 2010; Chaturvedi et al. 2010).





# CAPÍTOL 6:

## CAS PRÀCTIC

En aquest capítol es mostren els resultats del cas pràctic desenvolupat amb el model. Primer, es valorarà quina és la quantitat d'usuaris a simular i el període total de la simulació. A continuació, es presentaran les dades corresponents a la mobilitat del conjunt d'usuaris, ja que seran les mateixes per a cada escenari de càrrega. Finalment, es mostraran els resultats per cadascun dels casos i es compararan els perfils energètics i d'envelliment.

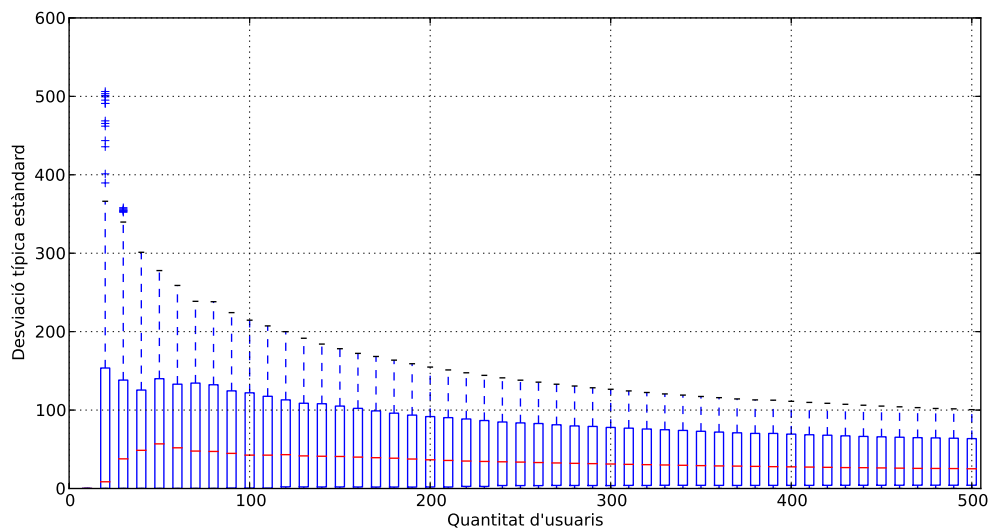
### 6.1 Escenari de la simulació

Al desenvolupar models és essencial dimensionar la població sobre la que es farà l'estudi. S'han d'avaluar una quantitat representativa d'usuaris, que permetin obtenir uns resultats extrapolables a d'altres poblacions, amb característiques similars. S'ha utilitzat el mètode de Monte Carlo amb el que, repetint el procés una quantitat suficient de vegades amb variacions en les dades d'entrada, s'obté una rang de resultats. Quant menor sigui la variació de resultats dintre d'aquest rang, més robust serà el model i més fidel en l'extrapolació.

Els resultats de la simulació per l'escenari del Cas 1 es mostren en la Figura 6.1. Es pot concloure que a major població simulada, major serà la robustesa del resultat. Al mateix temps, una quantitat elevada d'agents suposa un major temps de simulació. Per les limitacions temporals del model, es va decidir elaborar la simulació amb 150 agents. Aquest valor suposa una part negligible de la flota de vehicles de combustió, però serveix per crear un escenari base.

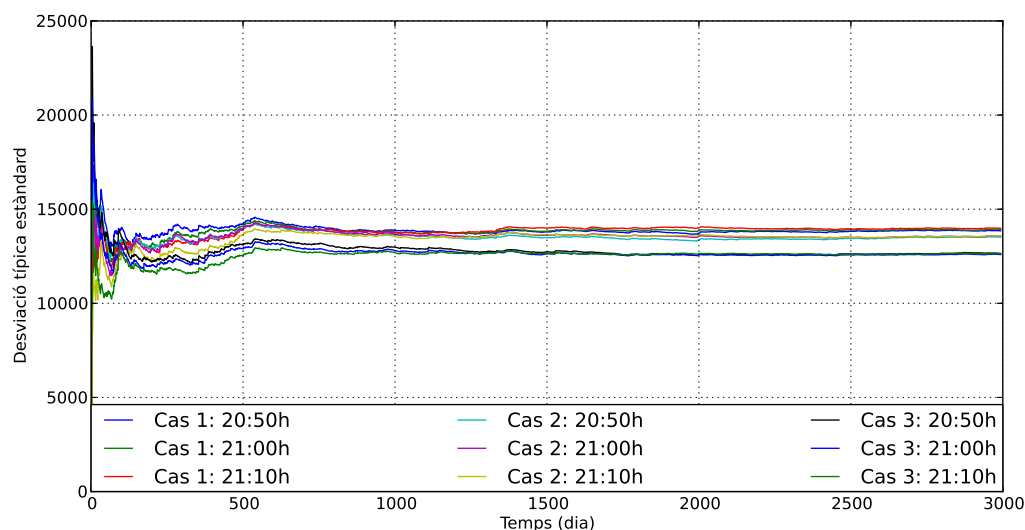
Amb la quantitat d'usuaris decidida, el pas següent és dimensionar el període de simulació. El model elaborarà diferents perfils de mobilitat per cadascun dels dies, i per cada usuari, el que generarà un volum de dades considerable.

Un dels objectius del treball és perfilar l'envelliment de les bateries. Per constatar un canvi substancial s'ha d'avaluar un període suficientment llarg que, com s'ha vist en la secció 2.2.3, és d'uns 10 anys en les condicions actuals. Considerant que el període d'utilització del vehicle és d'uns 300 dies l'any (Pallisé et al. 2010),



**Figura 6.1:** *Valors de la desviació típica estàndard de la potència mitjana per usuari.*

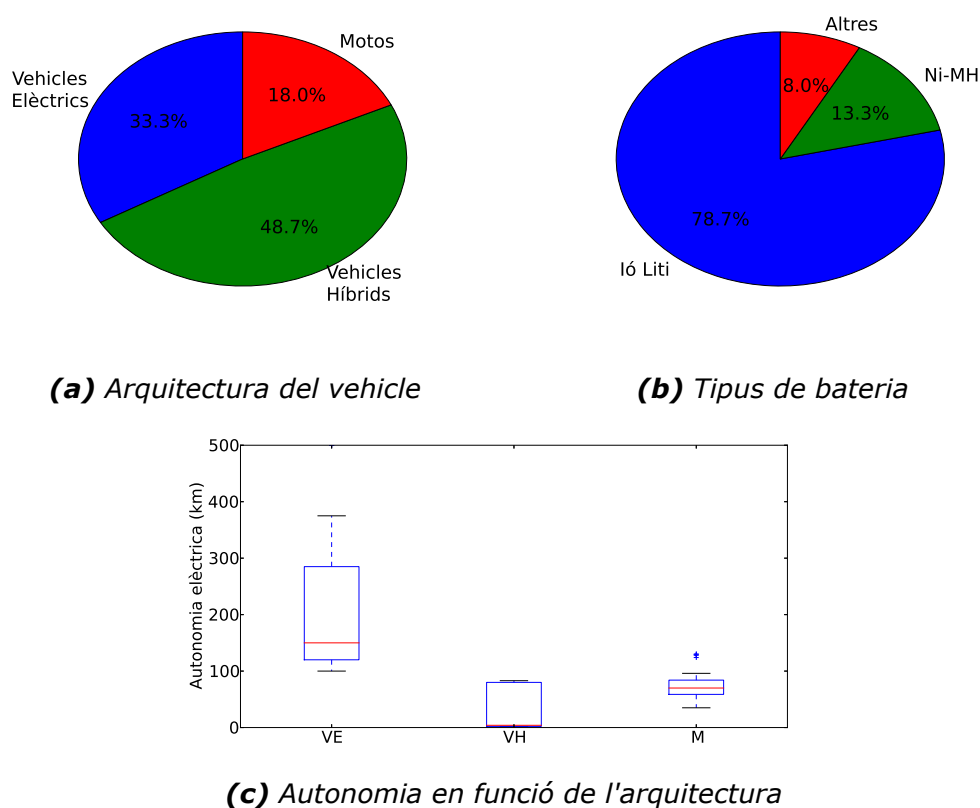
per un període de 10 anys, s'obté un total de 3000 dies. Si només s'hagués volgut avaluar la demanda energètica, no hagués estat necessari un període tan elevat, pel que s'hauria pogut incrementar la quantitat d'usuaris del model. En la Figura 6.2, s'han representat els valors de la desviació en diferents intervals, i per als tres casos. S'ha seleccionat les 21 h perquè és quan es produeix el pic de potència més elevat en les tres simulacions. S'observa que a partir dels 1500 dies, el valor és pràcticament invariable. Tot i així, per al càlcul de l'envelliment és important arribar als 3000 dies, encara que el temps de computació sigui elevat. Tota la simulació té una duració d'un 2 hores, repartides en mitja hora per cada cas i per l'elaboració dels perfils de mobilitat.



**Figura 6.2:** *Desviació típica en funció dels dies simulats i per cada cas.*

En la Figura 6.3, es mostra la repartició dels agents de la simulació a partir de l'arquitectura del vehicle i del tipus de bateria utilitzat. També es presenta l'autonomia, que és molt superior en els VE. L'elecció del tipus de vehicles s'ha

fet en funció de les necessitats de desplaçament calculades, i intentant respectar els percentatges de vehicles de les dades de mobilitat. És interessant observar en la Figura 6.3b que pràcticament el 80% de les bateries són d'ió liti.



**Figura 6.3:** Caracterització dels agents de la simulació.

## 6.2 Resultats de la mobilitat

Els perfils de mobilitat i temporalitat seran els mateixos en cadascun dels casos, per tal de poder comparar els perfils energètics de les diferents estratègies amb un mateix patró.

### 6.2.1 Resultats referents als desplaçaments

El primer mòdul a simular serà el de la mobilitat, tal com es mostra en l'esquema general de la Figura 5.1. En la Figura 6.4 s'observen els resultats obtinguts pel que fa a la longitud dels desplaçaments diaris per usuari, la longitud per desplaçament, la quantitat de viatges diaris, i el temps dedicat a la mobilitat diàriament.

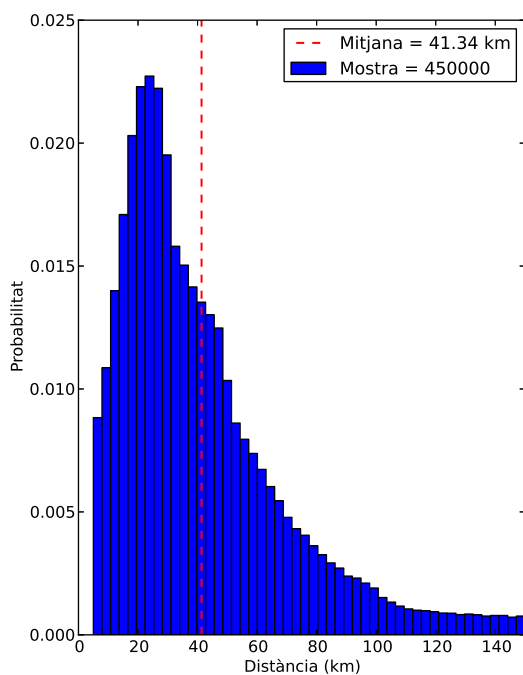
Tenint en compte que la distància mitjana recorreguda diàriament, al conjunt de l'estat espanyol, era de 34,2 km l'any 2006, el valor obtingut en la Figura 6.4a queda una mica lluny. La mitjana pel conjunt avaluat és de 41,34 km, uns 7 km superior al valor de referència. Aquesta diferència podria ser com a conseqüència d'utilitzar un valor de referència del 2006, i al mateix temps construir el model

utilitzant dades estadístiques de desplaçament referents al 2012 (Cetelem 2012). D'altra banda, si es comparen amb els valors del projecte The EV Project de la Taula 3.4, la diferència es redueix substancialment.

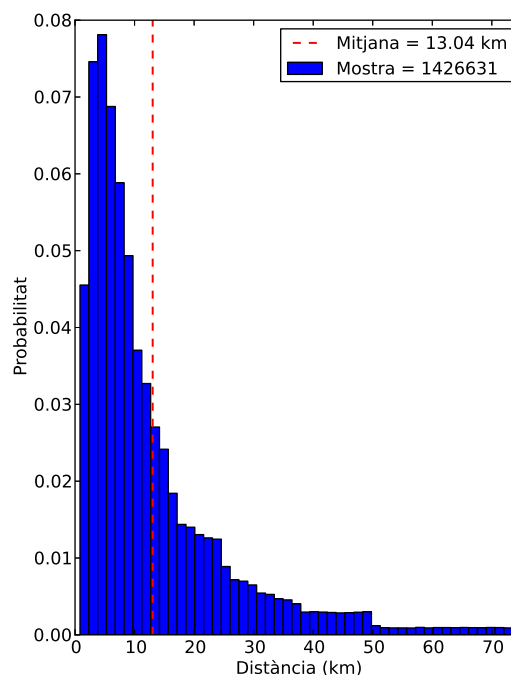
La Figura 6.4c mostra una mitjana de 3,17 viatges diaris per persona. Aquest valor també dista considerablement dels 1,95 desplaçaments al dia per persona en vehicle privat de l'any 2006. L'explicació en aquest cas és que tots els vehicles que es comptabilitzen en la simulació faran un mínim de 2 viatges per dia, mentre que en les dades de l'Autoritat del Transport Metropolità (2006), es comptabilitzen els vehicles inactius. No s'ha inclòs la possibilitat de que hi hagi vehicles inactius, ja que l'objectiu era avaluar un grup d'usuaris en unes condicions d'ús intensiu del vehicle, i veure si l'autonomia del vehicle elèctric era suficient.

### *6.2.2 Resultats referents a la distribució horària*

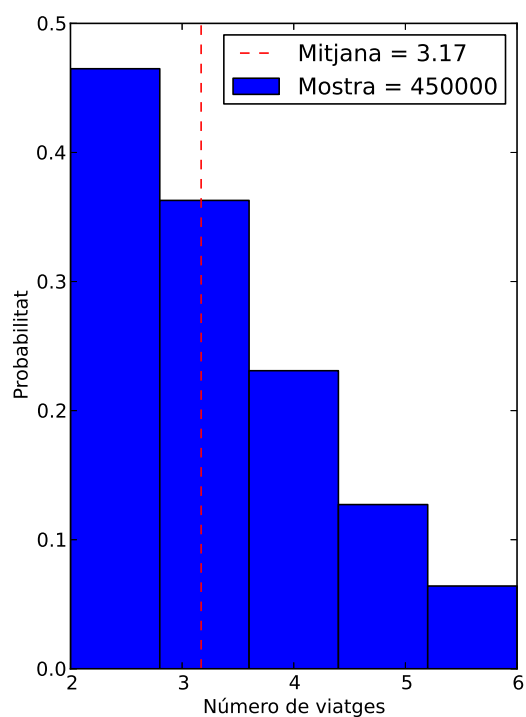
Les distribucions horàries s'ajusten a les dades d'entrada, com es demostra a la Figura 6.5. Tot i així, s'observa que per a les distribucions de viatges per motius personals, hi ha poca correlació durant la primera meitat del dia. Això és a causa del sistema per torns que s'ha utilitzat en l'algorisme, per tal d'ordenar els viatges d'una manera determinada. Al donar preferència als viatges per motius ocupacionals durant el matí, els que tenen motius personals queden relegats a la tarda. De totes maneres, els resultats de la simulació són satisfactoris.



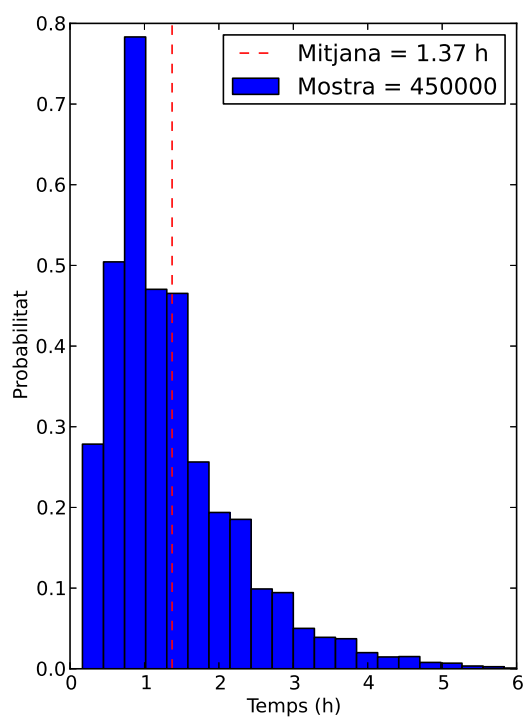
**(a)** Distància diària per usuari



**(b)** Desplaçaments diaris

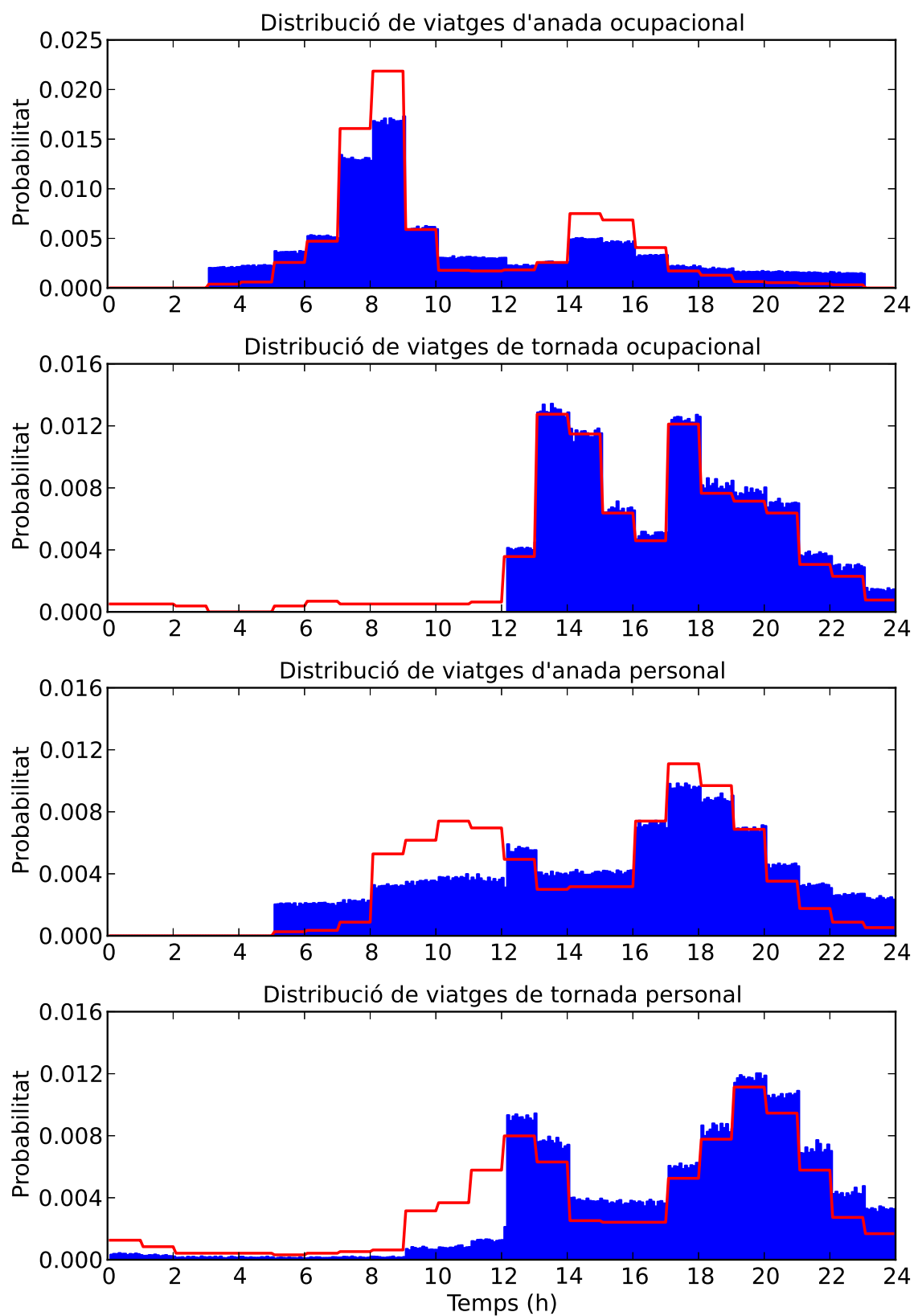


**(c)** Viatges diaris



**(d)** Temps dedicat a la mobilitat

**Figura 6.4:** Resultats del mòdul de mobilitat referents a la distància.

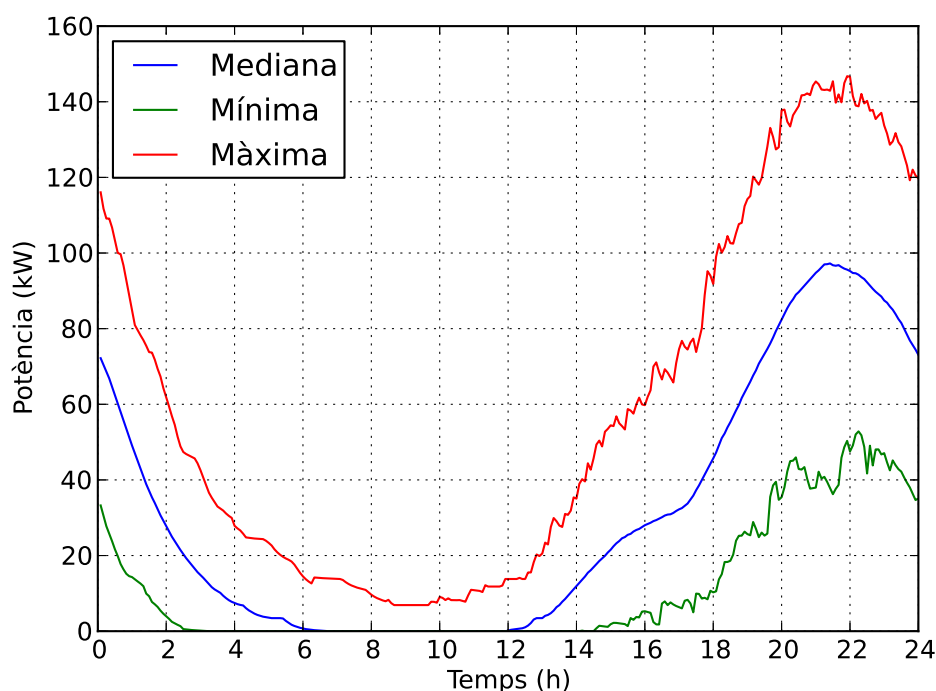


**Figura 6.5:** Distribucions horàries per als diferents motius. Dades de referència (vermell) i dades de la simulació (blau).

## 6.3 Cas 1: Càrrega al final del dia

Per al primer cas, els agents només carregaran una vegada hagin finalitzat tots els desplaçaments. No es contempla que hi hagi càrregues amb discriminació horària, ni una limitació en la utilització de la bateria. El rendiment de càrrega serà del 88% i la temperatura ambient i de la bateria de 25 °C.

En la Figura 6.6 s'ha representat el perfil de potència dels usuaris. El pic es produeix cap a les 21 h, ja que és quan la majoria dels usuaris han finalitzat tots els seus desplaçaments i estan carregant la bateria. Al mateix temps, el valor de la potència decreix entre les 24 h i les 6 h, el que indica que els vehicles van finalitzant la càrrega de la bateria. El fet que el valor de la mediana sigui pràcticament nul, entre les 6 h i les 12 h, indica que hi ha un volum molt baix de vehicles carregant. Aquest fet té sentit, ja que la majoria de cotxes iniciaran els seus desplaçaments diaris dintre d'aquest període, i no s'ha habilitat la càrrega entre desplaçaments.



**Figura 6.6:** Perfil de potència per al Cas 1.

La Figura 6.7 mostra la càrrega de la bateria al principi i al final del procés de càrrega, per cada grup de vehicles. En el cas del VE, molts usuaris comencen el procés de càrrega amb un estat de càrrega d'entre el 70 i 90%. Això podria indicar que l'autonomia de la majoria de VE és molt superior a les necessitats diàries, pel cas estudiat. També és interessant veure que al final de la càrrega, pràcticament la totalitat dels vehicles han carregat la bateria fins a un rang d'entre el 90 i el 100%. Això indicaria que la càrrega nocturna és suficient per fer una càrrega completa, fins i tot en els casos en els que el vehicle arriba amb la bateria buida.

Pel que fa als VH, la gran majoria arriben amb un estat de càrrega inferior al 10%.

Això té sentit, ja que els VH en paral·lel i els VH en sèrie, s'avaluen de la mateixa manera dintre del model. Els primers tindran bateries de molt poca capacitat, ja que només són un suport al motor de combustió per millorar l'eficiència. Els altres tindran una bateria de característiques semblants a les dels VE, però amb una capacitat inferior. Tenint en compte que la majoria d'híbrids considerats són d'arquitectura en paral·lel, és comprensible obtenir aquests resultats. Finalment, al final del període nocturn s'hauran carregat les bateries completament.

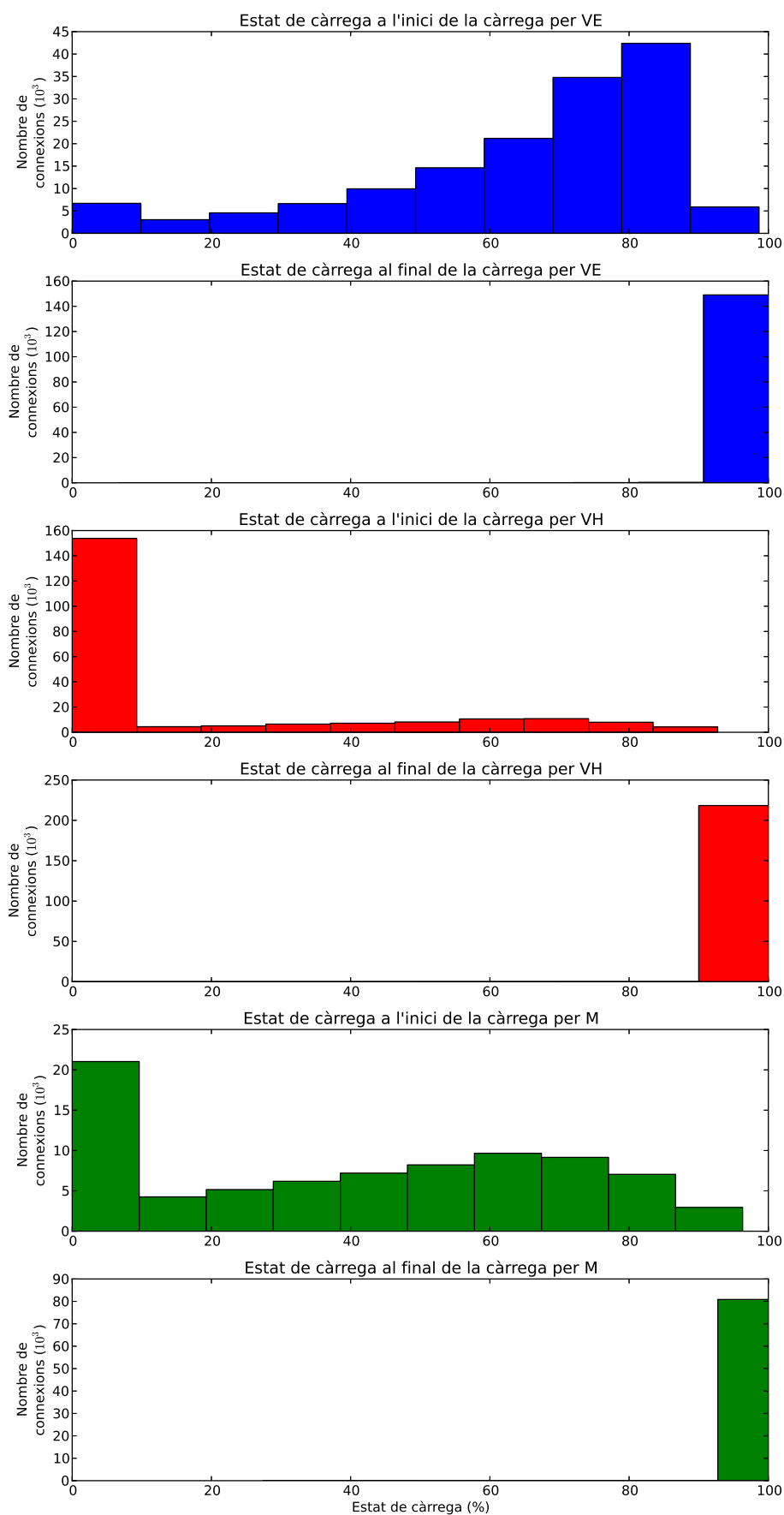
En el cas de les M, sembla que també hi ha un gran nombre de connexions que es comencen amb una càrrega inferior al 10%. Si es considera que l'autonomia és molt inferior a la dels VE i que no tenen un altre sistema de propulsió com els VH, seran el grup més perjudicat per les limitacions de la bateria. És possible que, per a aquest conjunt, una única càrrega nocturna no sigui suficient, i es necessitin càrregues suplementàries entre desplaçaments. D'altra banda, també és possible que es generin viatges de distàncies superiors a les de la capacitat de les bateries, pel fet que les dades de desplaçament són específiques per turismes, el que no es solucionaria amb una càrrega entre desplaçaments.

Pel que fa a l'envelliment de les bateries, en la Figura 6.8 s'observa un reducció de la càrrega màxima en funció dels dies transcorreguts. Al final del període estudiat, la mediana dels agents es situa al 80% de la capacitat inicial, però el rang de resultats va des del 87 fins al 74%. Considerant que el final de la vida de la bateria està en aquests valors, els resultats s'ajusten al previst. Alguns vehicles ja havien superat el llindar del 80% als 2300 dies, moment en el qual s'hauria d'haver efectuat un canvi de bateria.

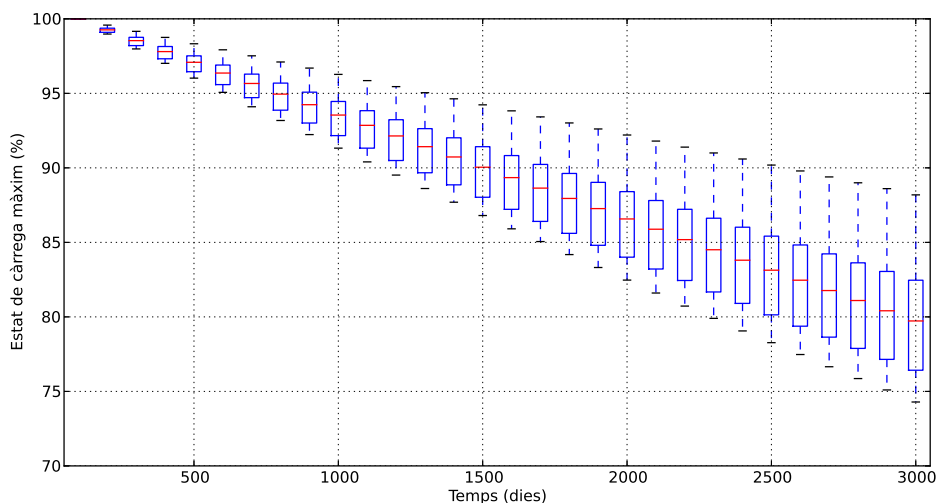
Si s'estudien els resultats de l'envelliment amb més precisió, es poden trobar diferències significatives entre les diferents arquitectures de vehicles estudiades. Com es mostra en la Figura 6.9, les bateries que més ràpidament envelleixen són les dels VH. Una de les possibles raons és la quantitat de cicles que efectuen diàriament aquestes bateries. Al només tenir una sola recàrrega durant el dia, la majoria de bateries arriben buides i marxen plenes, un cop ha finalitzat la càrrega (Figura 6.7). Aquest rang d'operació tan ampli les afecta negativament, enfront les del VE, que són les que pateixen una menor descàrrega. En el cas de les M, el seu envelliment es situa en un terme mig entre les del VE i VH.

És interessant observar la correlació entre l'energia consumida i l'envelliment de les bateries, ja que a mesura que es redueix la capacitat de càrrega de la bateria, també ho fa el consum d'energia. Com es mostra en la Figura 6.10, una menor càrrega i capacitat es tradueix en un major nombre de viatges no realitzats per VE i M.

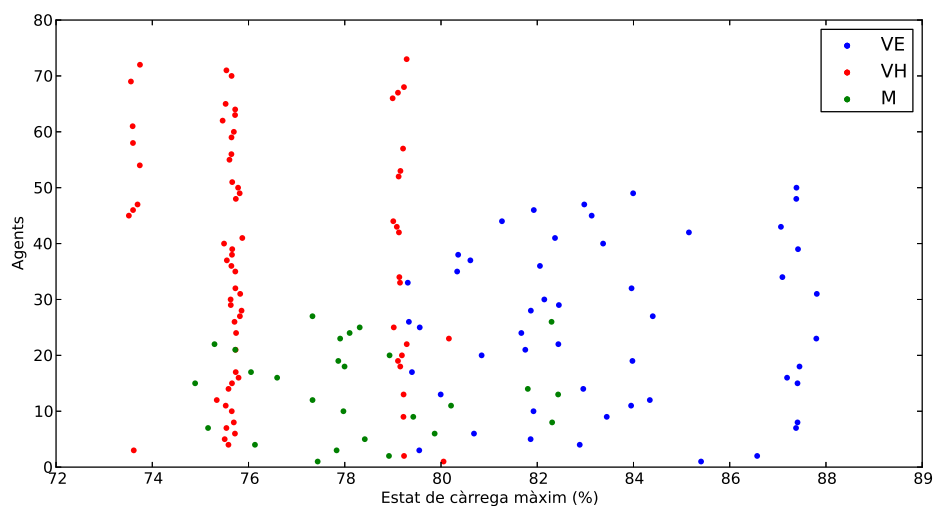




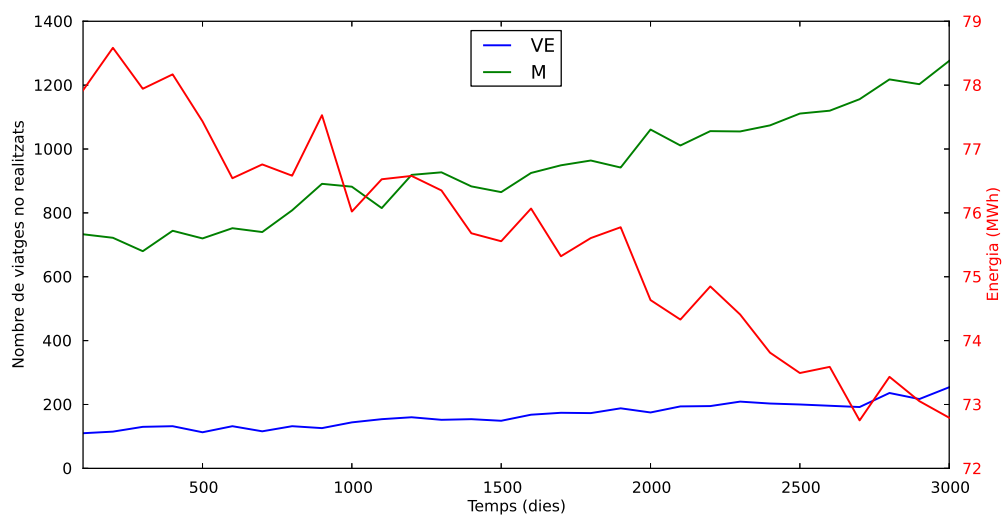
**Figura 6.7:** Estat de càrrega de la bateria per a l'inici i el final del procés de càrrega en el Cas 1.



**Figura 6.8:** Estat de la bateria per al Cas 1.



**Figura 6.9:** Estat de la bateria per tipus de vehicle al Cas 1.

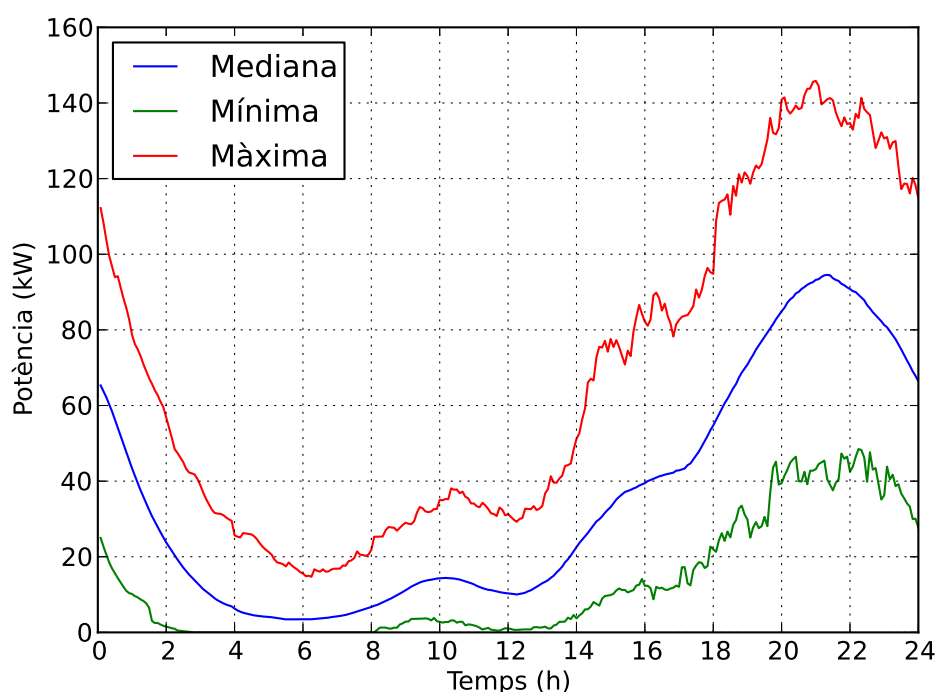


**Figura 6.10:** Energia consumida per tots els vehicles i desplaçaments no realitzats per VE i M.

## 6.4 Cas 2: Càrrega al final del dia amb suport entre desplaçaments

Per al segon cas, les característiques són les mateixes que en el primer, però s'imposa un límit màxim de càrrega del 80% i un mínim del 20%. Això farà que els vehicles només carreguin fora de casa, si el seu estat de càrrega és inferior al mínim. El rendiment de càrrega es manté en el 88% i les temperatures ambient i de la bateria a 25 °C.

En la Figura 6.11 s'observa un perfil similar al del primer cas. El pic de potència també és a les 21 h, tot i que una mica inferior que en el cas anterior. La variació més destacable es produeix en el període comprès entre les 6 i les 12 h, en el que s'observa l'efecte de la càrrega després dels desplaçaments matinals.



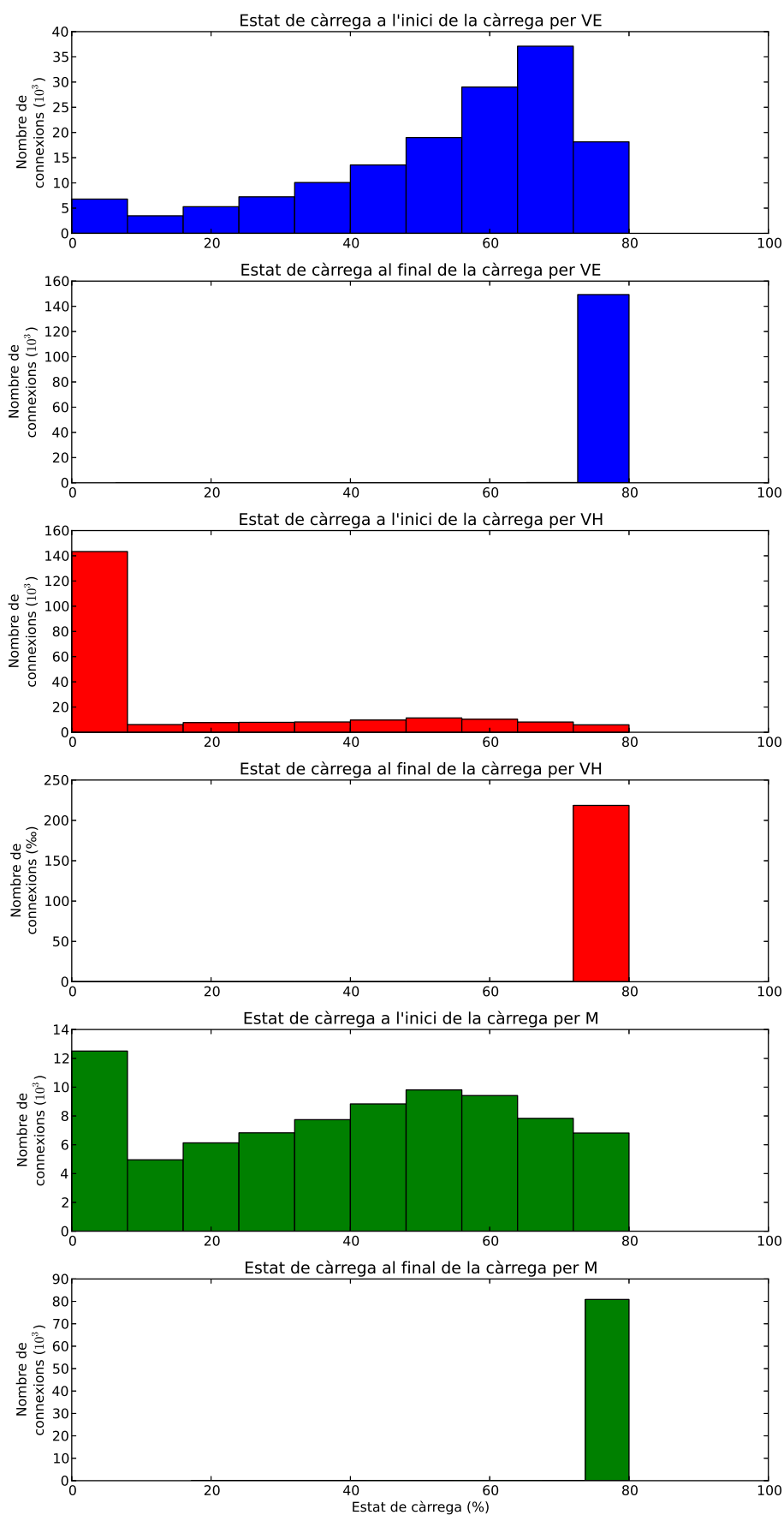
**Figura 6.11:** Perfil de potència per al Cas 2.

El resultat d'aquesta càrrega entre desplaçaments té un efecte més visible en les Figures 6.12 i 6.15. D'una banda, s'ha reduït el rang de la bateria, limitant encara més l'autonomia de tots els vehicles, però amb el suport entre desplaçaments, l'efecte negatiu es veu mitigat. Les motos són les que en surten més beneficiades, ja que de les  $20 \cdot 10^3$  càrregues que s'havien iniciat amb un estat de càrrega inferior al 10% s'ha passat a poc més de  $12 \cdot 10^3$ . També s'observa que hi ha una reducció en el nombre de viatges no realitzats per motos, però es manté constant el de VE.

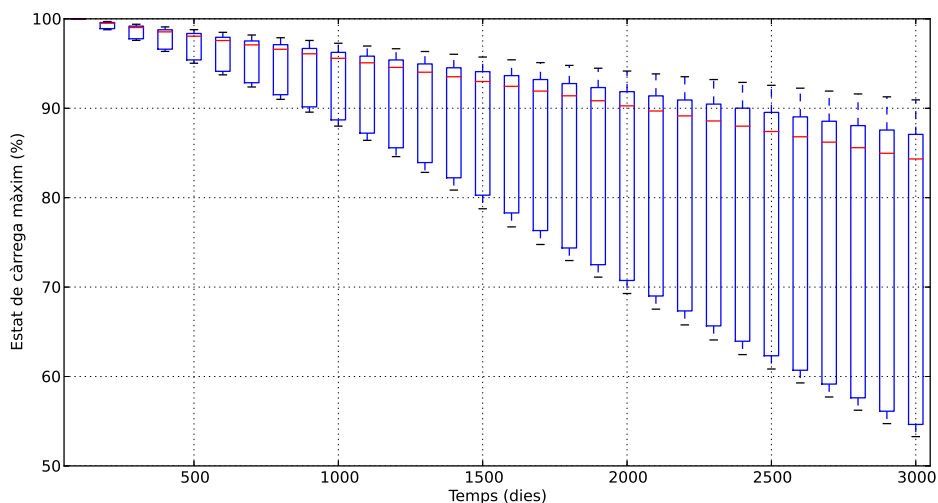
Pel que respecta a l'envelliment de la bateria, la Figura 6.13 mostra el resultat esperat, ja que la mediana està situada al 85% de càrrega total. El que s'observa és una diversitat de resultats major, que van des del 90 fins al 55% de la capacitat inicial. S'esperava que amb la reducció del *swing*, tots els vehicles tinguessin una major vida útil. Tot i així, l'explicació es pot trobar en la Figura 6.14, en la que

es mostra l'envelliment per tipus de vehicles. Els resultats globals són similars al primer cas, en el sentit que les bateries de VE són les menys deteriorades i les dels VH les que més. La informació que dóna és que, la majoria de les bateries dels VH estan molt més envellides que no en el cas anterior. En canvi les del VE s'han conservat millor, mentre que les bateries de les motos han patit un envelliment lleugerament menor. L'explicació està en els cicles i els intercanvis energètics que han fet les bateries durant tot el període. Mentre que les dels VE sempre s'han mantingut en un rang al voltant del 60% de càrrega (Figura 6.12) i fent poc més d'un cicle diari, les dels VH han patit múltiples càrregues i descàrregues completes durant el dia. Això és conseqüència de la càrrega entre desplaçaments, i acaba generant un envelliment més sever. Tot i així, el consum de combustible serà inferior que en el primer cas.

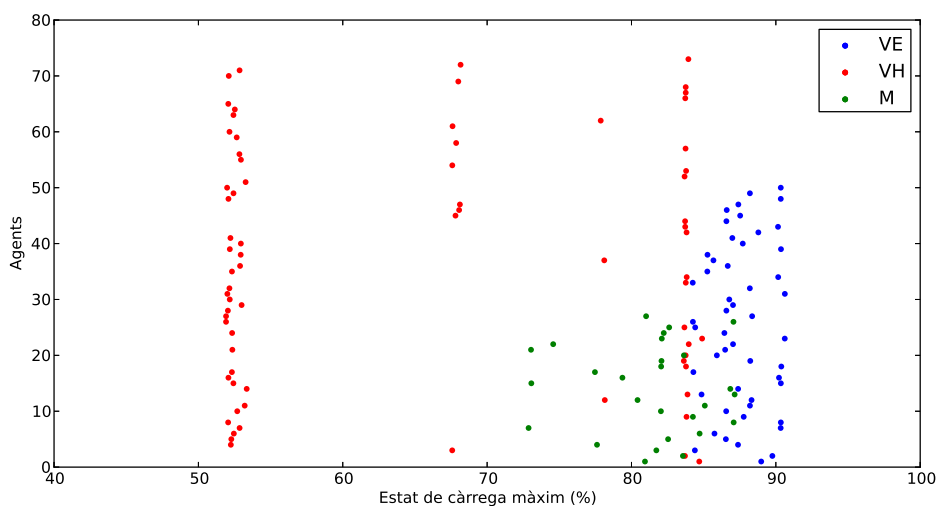
Finalment, el consum energètic és superior, ja que hi ha més episodis de càrrega, i es redueix el nombre de viatges no finalitzats, com es mostra a la Figura 6.15 respecte la Figura 6.10. També és interessant constatar que el nombre de viatges no realitzats no augmenta amb l'envelliment de la bateria, ja que pràcticament no afecta el límit màxim de càrrega. Tot i així, l'energia consumida es comença a reduir a partir dels 1500 dies simulats. Això és per l'efecte dels VH que tenen un envelliment major, i que comencen a perdre càrrega útil a partir d'aquest punt (Figura 6.13).



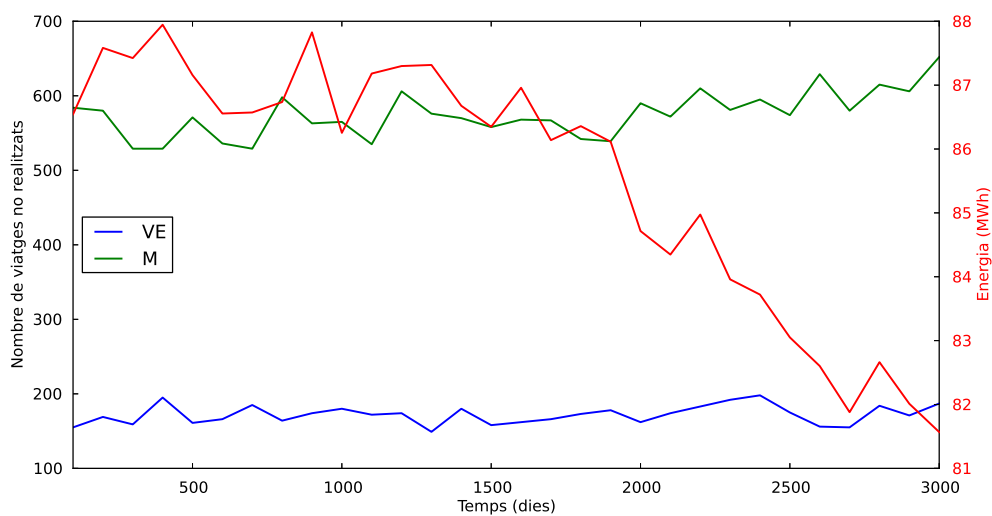
**Figura 6.12:** Estat de càrrega de la bateria per a l'inici i el final del procés de càrrega en el Cas 2.



**Figura 6.13:** Estat de la bateria per al Cas 2.



**Figura 6.14:** Estat de la bateria per tipus de vehicle al Cas 2.

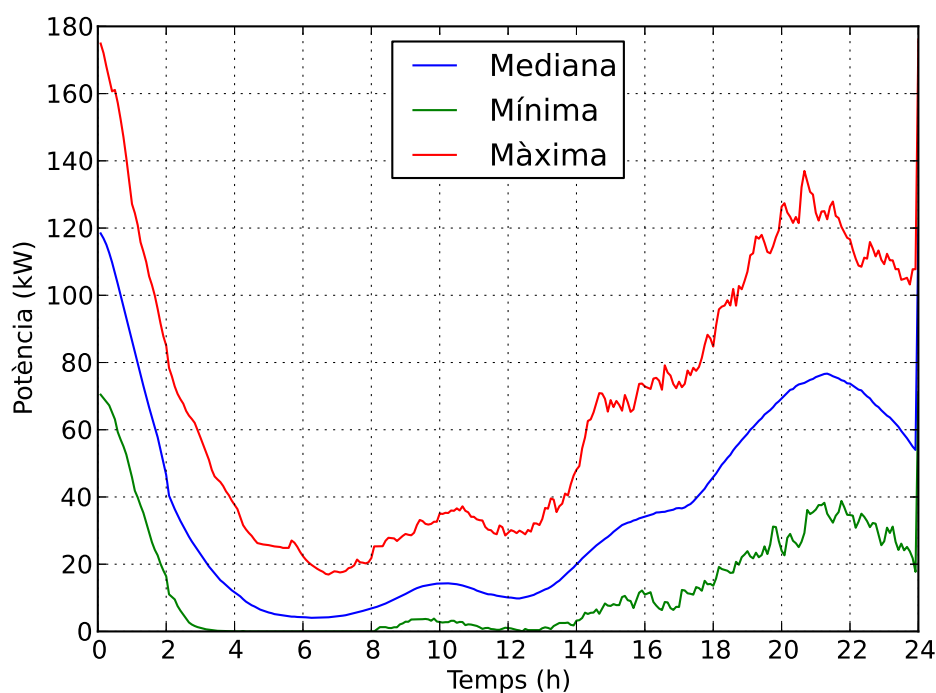


**Figura 6.15:** Energia consumida per tots els vehicles i desplaçaments no realitzats per VE i M.

## 6.5 Cas 3: Càrrega amb discriminació horària

Les dades inicials per aquest simulació són les mateixes que per al Cas 2, pel que fa a temperatures, limitacions de la bateria i rendiments de càrrega.

En aquest última simulació s'ha considerat que un percentatge dels usuaris tindrien la càrrega nocturna desplaçada, per tal d'emular un escenari amb un règim econòmic del tipus ToU. En el cas d'Espanya l'hora supervall, comença a les 24 h, pel que pel percentatge d'usuaris pertinent es comença la càrrega nocturna a partir d'aquesta hora. En els resultats, presentats en la Figura 6.16, s'observa una reducció del pic de potència de les 21 h, respecte als escenaris anteriors, però el fet de començar la càrrega conjuntament a les 24 h genera un nou pic de magnituds superiors, fins als 120 kW. Tenint en compte que, en aquest cas, només s'ha habilitat la discriminació horària per al 20% dels usuaris de la simulació, el pic que es genera és prou important.

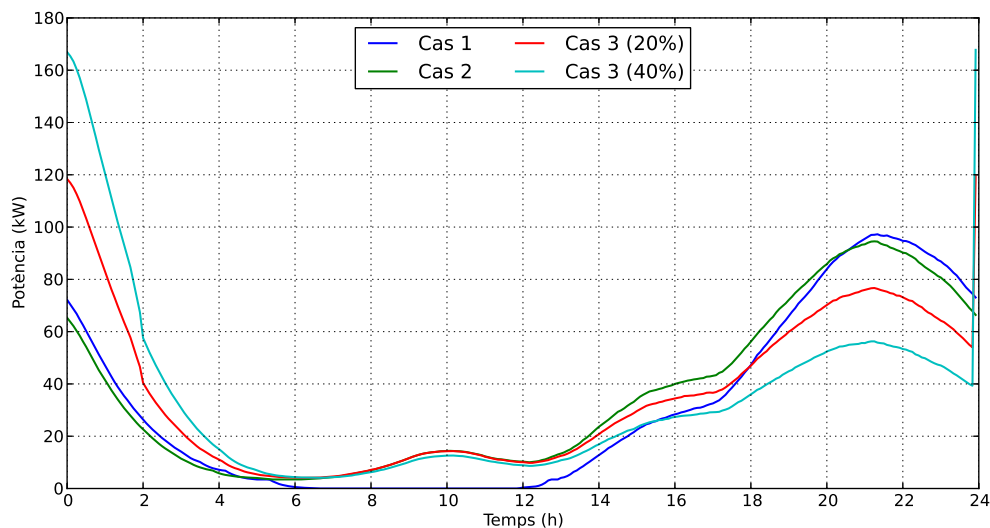


**Figura 6.16:** Perfil de potència per al Cas 3.

En la Figura 6.17 es fa una comparació amb els escenaris simulats, per apreciar la reducció del pic de les 21 h a mesura que s'augmenta el percentatge d'usuaris que inicien la càrrega a partir de les 24 h. La magnitud del pic serà proporcional al nombre d'usuaris.

Pel que fa als processos de càrrega, i envelliment de la bateria, els resultats són idèntics als del cas anterior, com es mostra en la Figura 6.18, pel fet que la càrrega entre desplaçaments seguirà sent molt més problemàtica pels VH i beneficiosa per als VE i M. A més, els usuaris que fan a recàrrega amb discriminació horària no es veuen perjudicats per tenir un menor temps de càrrega nocturna, ja que els desplaçaments no generats en cada cas són molt similars.

Així doncs, s'ha decidit fer una nova simulació per tal de veure la incidència de

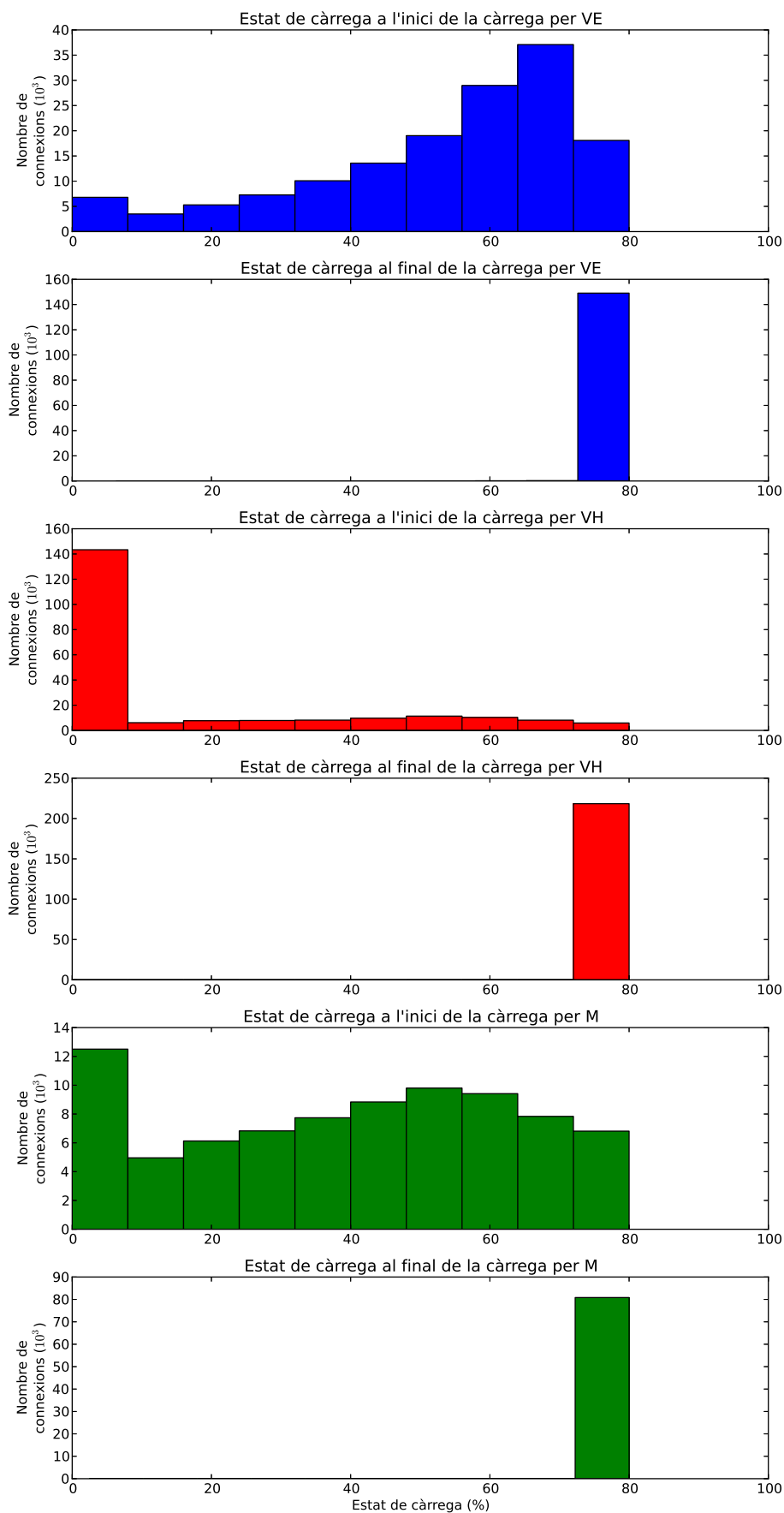


**Figura 6.17:** Comparativa dels perfils de potència dels diferents escenaris.

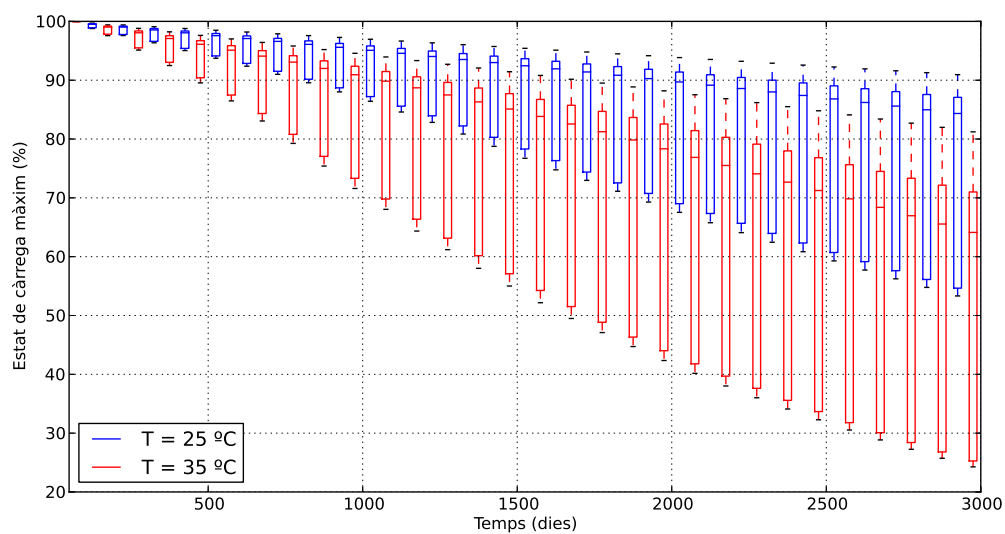
la temperatura. En la Figura 6.19 es mostren els resultats, per al Cas 3, d'una bateria en diferents condicions de temperatura. S'ha de tenir en compte que el model no permet fer variacions entre dies, pel que aquesta temperatura serà la mateixa durant tota la simulació. Podria considerar-se com una temperatura mitjana d'operació durant el període.

La simulació amb una temperatura de 25 °C té un perfil idèntic al del cas anterior, ja que s'utilitzen les mateixes condicions, però en el cas dels 35 °C hi ha una degradació bastant més crítica. Pràcticament la totalitat dels vehicles tenen un envelliment superior al 20%, i n'hi ha que estan per sota del 30% de capacitat restant, passats els 3000 dies (Figura 6.20). Això demostra la importància dels sistemes de refrigeració de les bateries per aquest tipus de vehicles.

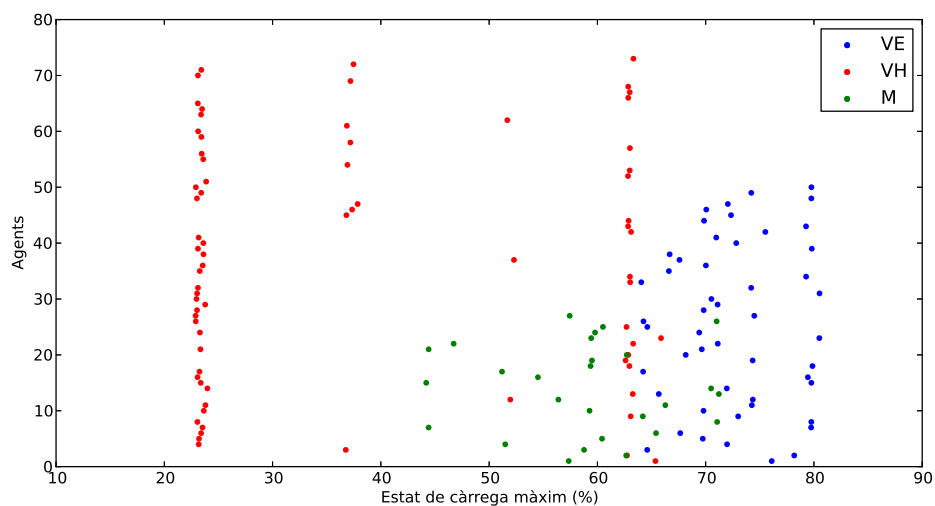




**Figura 6.18:** Estat de càrrega de la bateria per a l'inici i el final del procés de càrrega en el Cas 3.



**Figura 6.19:** Comparativa de l'estat de la bateria pels usuaris del Cas 3 per a diferents temperatures.



**Figura 6.20:** Estat de la bateria per tipus de vehicle al Cas 3 i per  $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

# CAPÍTOL 7:

## CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquest projecte era elaborar un model per estimar la demanda energètica de vehicles elèctrics urbans. Per assolir-ho, s'ha fet un estudi de l'estat actual del vehicle elèctric i de les tipologies de bateries actuals. També s'han analitzat els perfils de mobilitat d'usuaris residents a la ciutat de Barcelona, i altres dades referents a la mobilitat amb vehicle elèctric. Finalment s'ha programat un model capaç de simular usuaris amb unes necessitats de mobilitat que s'havien de cobrir amb vehicles elèctrics de característiques determinades. S'han contemplat diferents escenaris de càrrega per recrear situacions diverses i extreure'n conclusions. El model obtingut és flexible, el que permet representar una ampli rang d'escenaris.

Els perfils de potència obtinguts en el cas pràctic mostren un pic de potència entre les 20 i les 22 hores, pels casos en els que no hi ha cap restricció pel que fa a horaris de càrrega. Com era d'esperar, els períodes de càrrega estan correlacionats amb els desplaçaments de tornada, i el període nocturn és suficientment llarg per carregar les bateries al màxim. En els casos en els que l'inici de la càrrega nocturna està desplaçada, la corba de potència es redueix entre les 18 i 24 h, però té un increment de més de 40 kW en el cas estudiat. Tot i que no s'han contemplat les corbes de potència de la xarxa, una càrrega durant el període de les 18 a 24 hores és molt més difícil d'assumir que passades les 24 hores.

Pel que fa a l'envelliment de les bateries, s'ha vist una degradació superior en les dels vehicles híbrids per als casos 2 i 3. Això es produeix com a conseqüència de la gran quantitat de cicles diaris de càrrega i descàrrega, pel fet de tenir la possibilitat de carregar entre desplaçaments. Per als vehicles elèctrics i les motos, la limitació del rang de capacitat de la bateria no afecta negativament la seva mobilitat, i permet allargar la vida útil de la bateria. En el cas simulat amb una temperatura de la bateria de 35 °C, els efectes de l'envelliment s'han accelerat, i la totalitat dels vehicles de la simulació han acabat amb una bateria que es podria considerar al final de la seva vida útil. Tant el perfil energètic com el de mobilitat es veuran afectats per la pèrdua de capacitat dels usuaris, ja que es reduirà el volum d'energia a carregar, i l'autonomia elèctrica.

## 7.1 Treballs futurs

Durant l'elaboració del projecte s'han hagut de simplificar paràmetres i fer algunes pressuposicions, a la vegada que han sorgit noves idees i vies d'estudi que podrien ser útils de valorar. Alguns d'aquests punts es detallen a continuació com a possibles treballs futurs:

- Redefinir els paràmetres i corbes referents a una bateria concreta, a la que es tingui accés per fer els tests corresponents.
- Aplicar el model a una flota de vehicles professionals, amb uns perfils de mobilitat molt definits, i valorar-ne l'envelliment de la bateria i el cost global d'operació.
- Contemplar nous escenaris com el *vehicle to grid* (V2G), o gestionar la càrrega de múltiples vehicles amb unes restriccions de potència i estudiar-ne incentius econòmics.

# CAPÍTOL 8:

## BIBLIOGRAFIA

### 8.1 Referències bibliogràfiques

- Andrea, Davide. 2008. "Li-ion BMS - White Papers." [http://liionbms.com/php/white\\_papers.php](http://liionbms.com/php/white_papers.php).
- Autoritat del Transport Metropolità, (ATM), ed. 2006. "Enquesta Mobilitat Quotidiana 2006." <http://www.atm.cat/web/ca/mobilitat/EMQ2006.php>.
- Axsen, Jonn, Andrew F. Burke, and Kenneth S. Kurani. 2010. "Batteries for PHEVs: Comparing Goals and the State of Technology." Chap. 16 in *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*, edited by Gianfranco Pistoia, 405–427. Elsevier. doi:[10.1016/B978-0-444-53565-8.00016-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53565-8.00016-6).
- Bergveld, H.J. 2010. "Battery Management Systems: Design by Modelling," Royal Philips Electronics.
- Bonabeau, Eric. 2002. "Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (Suppl 3): 7280–7287. doi:[10.1073/pnas.082080899](https://doi.org/10.1073/pnas.082080899).
- Borshchev, Andrei, and Alexei Filippov. 2004. "From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools." In *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*. 22. Oxford, England, July.
- Broussely, M., Ph. Biensan, F. Bonhomme, Ph. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, and R.J. Staniewicz. 2005. "Main aging mechanisms in Li ion batteries." *Journal of Power Sources* 146 (1-2): 90–96. doi:[10.1016/j.jpowsour.2005.03.172](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.172).
- Buchmann, Isidor. 2001. *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. 2nd. Cadex Electronics Inc.

- Cetelem, Observador. 2012. *El coche eléctrico y los europeos. Análisis de los principales países europeos. Zoom España: análisis del mercado español del automóvil.*
- Chan, C.C. 2007. "The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles." *Proceedings of the IEEE* 95 (4): 704–718. doi:[10.1109/JPROC.2007.892489](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489).
- Chaturvedi, N.A., R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, and A. Kojic. 2010. "Algorithms for Advanced Battery-Management Systems." *Control Systems, IEEE* 30 (3): 49–68. doi:[10.1109/MCS.2010.936293](https://doi.org/10.1109/MCS.2010.936293).
- Chen, Min, and G.A. Rincon-Mora. 2006. "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 21 (2): 504–511. doi:[10.1109/TEC.2006.874229](https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229).
- Chen, Yee Ming, and Bo-Yuan Wang. 2012. "A study on modeling of human spatial behavior using multi-agent technique." *Expert Systems with Applications* 39, no. 3 (February): 3048–3060. doi:[10.1016/j.eswa.2011.08.167](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.08.167).
- Circuitor. 2013. *Recarga inteligente de vehículos eléctricos.*
- Clement, K., E. Haesen, and J. Driesen. 2009. "Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids." In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*, 1–7. doi:[10.1109/PSCE.2009.4839973](https://doi.org/10.1109/PSCE.2009.4839973).
- Clement-Nyns, K., E. Haesen, and J. Driesen. 2010. "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid." *Power Systems, IEEE Transactions on* 25 (1): 371–380. doi:[10.1109/TPWRS.2009.2036481](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036481).
- Departament d'Estadística, Ajuntament de Barcelona. 2007. *Informes estadístics: Cens de vehicles de la ciutat de Barcelona.* Ajuntament de Barcelona.
- Dinger, Andreas, Ripley Martin, Xavier Mosquet, Maximilian Rabl, Dimitrios Rizoulis, Massimo Russo, and Georg Sticher. 2010. *Batteries for Electric Cars. Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020.* The Boston Consulting Group.
- Duleep, Gopalakrishnan, Huib van Essen, Bettina Kampman, and Max Grünig. 2011. *Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 2. Assessment of electric vehicles and battery technology.* CE Delft.
- ECotality. 2013. "The EV Project." <http://www.theevproject.com/documents.php>.
- ElBanhawy, E.Y., R. Dalton, E.M. Thompson, and R. Kotter. 2012. "A heuristic approach for investigating the integration of electric mobility charging infrastructure in metropolitan areas: An agent-based modeling simulation." In *Environment Friendly Energies and Applications (EFEA), 2012 2nd International Symposium on*, 74–86. doi:[10.1109/EFEA.2012.6294081](https://doi.org/10.1109/EFEA.2012.6294081).
- Elias, M.F.M., K.M. Nor, N.A. Rahim, and A.K. Arof. 2003. "Lithium-ion battery charger for high energy application." In *Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. Proceedings. National*, 283–288. doi:[10.1109/PECON.2003.1437458](https://doi.org/10.1109/PECON.2003.1437458).
- e'mobile. 2013. *Ecocars 2013.* Technical report. Association e'mobile.

- Fan, Liwu, J.M. Khodadadi, and A.A. Pesaran. 2013. "A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles." *Journal of Power Sources* 238:301–312. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.03.050>.
- Galus, Matthias D., Marek Zima, and Göran Andersson. 2010. "On integration of plug-in hybrid electric vehicles into existing power system structures." *Energy Policy* 38 (11): 6736–6745. doi:[10.1016/j.enpol.2010.06.043](http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.043).
- Gao, Shuang, K.T. Chau, C.C. Chan, Chunhua Liu, and Diyun Wu. 2011. "Optimal Control Framework and Scheme for Integrating Plug-in Hybrid Electric Vehicles into Grid." *Journal of Asian Electric Vehicles* 9, no. 1 (July): 1473–1481. doi:[10.4130/jaev.9.1473](http://dx.doi.org/10.4130/jaev.9.1473).
- Green, Robert C., Lingfeng Wang, and Mansoor Alam. 2011. "The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1): 544–553. doi:[10.1016/j.rser.2010.08.015](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.015).
- IEA, International Energy Agency. 2012. *EV City Casebook. A look at the global electric vehicle movement*.
- Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona, (IERMB). 2012. "Enquesta de Mobilitat en dia Feiner (EMEF)." <http://www.iermb.uab.es/htm/mobilitat/cat/emef-12.asp>.
- Jennings, Nicholas R. 2000. "On agent-based software engineering." *Artificial intelligence* 117, no. 2 (March): 277–296. doi:[10.1016/S0004-3702\(99\)00107-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0004-3702(99)00107-1).
- Kalhammer, Fritz R., Bruce M. Kopf, David H. Swan, Vernon P. Roan, and Michael P. Walsh. 2007. *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*. Technical report. ARB Independent Expert Panel 2007.
- Karagiannopoulos, Stavros. 2012. "Battery modeling within Plug-in Vehicle Fleet Simulations in Smart-Grids." Semester Thesis, EEH - Power Systems Laboratory, ETH Zurich.
- Larminie, James, and John Lowry. 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Liaw, Bor Yann, E.Peter Roth, Rudolph G Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Herbert L Case, and Daniel H Doughty. 2003. "Correlation of Arrhenius behaviors in power and capacity fades with cell impedance and heat generation in cylindrical lithium-ion cells." *Journal of Power Sources* 119–121:874–886. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00196-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00196-4).
- Linden, David, and Thomas B Reddy. 2002. *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill.
- LIVE Barcelona. 2013. *Mou-te en vehicle elèctric. Guia pràctica de la mobilitat elèctrica*. Àrea d'Economia, Empresa i Ocupació. Ajuntament de Barcelona.
- Luck, Michael, Peter McBurney, Onn Shehory, and Steve Willmott. 2005. *Agent Technology Roadmap: A Roadmap for Agent Based Computing*. Edited by Michael Luck. University of Southampton.

- Macal, Charles M., and Michael J. North. 2006. "Introduction to Agent-based Modeling and Simulation."
- Macal, C.M., and M.J. North. 2010. "Tutorial on agent-based modelling and simulation." *Journal of Simulation* 4, no. 3 (September): 151–162. doi:<http://dx.doi.org/10.1057/jos.2010.3>.
- Marra, F., Guang Ya Yang, C. Traholt, E. Larsen, C.N. Rasmussen, and Shi You. 2012. "Demand profile study of battery electric vehicle under different charging options." In *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 1–7. doi:[10.1109/PESGM.2012.6345063](https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345063).
- Millner, A. 2010. "Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles." In *Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on*, 349–356. doi:[10.1109/CITRES.2010.5619782](https://doi.org/10.1109/CITRES.2010.5619782).
- Moore, Stephen W., and Peter J. Schneider. 2001. "A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems." In *SAE Technical Paper Series*, edited by The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space.
- MOVELE, Proyecto de la Movilidad Eléctrica. 2013. "Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico." <http://movele.ayesa.es/movele2/>.
- Olivella, Pol. 2012. "Modelado de la demanda de carga lenta y rápida de vehículos eléctricos para el estudio de impacto en la red de distribución," Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (UPC).
- Pallisé, Joan, Francesc Astals, Ignasi Cair, Joan Comellas, Francesc Martínez, and Jordi Serra. 2010. *Diagnosi i perspectives del vehicle elèctric a Catalunya - (Informes del CADS ; 10)*. Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible (CADS).
- Peterson, Scott B., Jay Apt, and J.F. Whitacre. 2010. "Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization." *Journal of Power Sources* 195 (8): 2385–2392. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.010>.
- Pistoia, Gianfranco. 2010. *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Elsevier.
- Román, Tomás Gómez San, Ilan Momber, Michel Rivier Abbad, and Álvaro Sánchez Miralles. 2011. "Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: Infrastructure, agents, and commercial relationships." *Energy Policy* 39 (10): 6360–6375. doi:[10.1016/j.enpol.2011.07.037](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.037).
- Rößler, Werner. 2008. "Boost Battery Performance with Active Charge-Balancing." *EE Times-Asia*.
- Shao, Shengnan, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman. 2009. "Challenges of PHEV penetration to the residential distribution network." In *Power Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE*, 1–8. doi:[10.1109/PES.2009.5275806](https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275806).



- Smith, Kandler, Tony Markel, Gi-Heon Kim, and Ahmad Pesaran. 2010. "Design of electric drive vehicle batteries for long life and low cost." In *IEEE Workshop on Accelerated Stress Testing and Reliability (ASTR)*, 6–8.
- Sony, Corporation. 2005. *Lithium Ion Rechargeable Batteries: Technical Handbook*. Technical report. Sony Corporation.
- Valsera-Naranjo, Eduardo, David Martínez-Vicente, Andreas Sumper, Roberto Villafafila-Robles, and Andreu Sudrià-Andreu. 2011. "Deterministic and probabilistic assessment of the impact of the electrical vehicles on the power grid." In *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 1–8. doi:[10.1109/PES.2011.6039546](https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039546).
- Valsera-Naranjo, Eduardo, Andreas Sumper, Roberto Villafafila-Robles, and David Martínez-Vicente. 2012. "Probabilistic Method to Assess the Impact of Charging of Electric Vehicles on Distribution Grids." *Energies* 5 (5): 1503–1531. doi:[10.3390/en5051503](https://doi.org/10.3390/en5051503).
- Violland, Michel. 2011. "Travel / Mobility Surveys: Some Key Findings." In *International Transport Forum*.
- Wen, Sihua. 2009. "Cell Balancing Buys Extra Run Time and Battery Life." *Analog Applications Journal*.
- Wood, Eric, Jeremy Neubauer, Aaron D Brooker, Jeffrey Gonder, and Kandler A Smith. 2012. "Variability of Battery Wear in Light Duty Plug-in Electric Vehicles Subject to Ambient Temperature, Battery Size, and Consumer Usage: Preprint." In. National Renewable Energy Laboratory.
- Xu, Yanzhi. 2010. "Effective GPS-based panel survey sample size for urban travel behavior studies."
- Young, Kwo, Caisheng Wang, LeYi Wang, and Kai Strunz. 2013. "Electric Vehicle Battery Technologies." Chap. 2 in *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, edited by Rodrigo Garcia-Valle and João A. Peças Lopes, 15–56. Power Electronics and Power Systems. Springer New York. doi:[10.1007/978-1-4614-0134-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0134-6_2).
- Yuksel, Tugce, and Jeremy Michalek. 2012. "Development of a Simulation Model to Analyze the Effect of Thermal Management on Battery Life." *SAE Technical Paper:01–0671*.

## 8.2 Bibliografia de consulta

- Acha, S., T.C. Green, and N. Shah. 2011. "Optimal charging strategies of electric vehicles in the UK power market." In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES*, 1–8. doi:[10.1109/ISGT.2011.5759128](https://doi.org/10.1109/ISGT.2011.5759128).
- Acha, Salvador, Koen H Van Dam, James Keirstead, and Nilay Shah. 2011. "Integrated Modelling of Agent-based Electric Vehicles Into Optimal Power Flow Studies." In *21st International Conference on Electricity Distribution*. Frankfurt, June.

- Axelrod, Robert, and Leigh Tesfatsion. 2006. "Appendix AA Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences." *Handbook of Computational Economics* 2:1647–1659. doi:[10.1016/S1574-0021\(05\)02044-7](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02044-7).
- Bankes, Steven C. 2002. "Agent-based modeling: A revolution?" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99, no. Suppl 3 (May): 7199–7200. doi:[10.1073/pnas.072081299](https://doi.org/10.1073/pnas.072081299).
- Guo, Qinglai, Yao Wang, Hongbin Sun, Zhengshuo Li, Shujun Xin, and Boming Zhang. 2012. "Factor Analysis of the Aggregated Electric Vehicle Load Based on Data Mining." *Energies* 5 (6): 2053–2070. doi:[10.3390/en5062053](https://doi.org/10.3390/en5062053).
- HARDING Energy, Inc. 2004. *Harding Battery Handbook For Quest® Rechargeable Cells and Battery Packs*. Technical report. HARDING Energy Inc.
- Hunter, J. D. 2007. "Matplotlib: A 2D graphics environment." *Computing In Science & Engineering* 9 (3): 90–95.
- Jongerden, M.R., and B.R. Haverkort. 2008. *Battery Modeling*. Enschede, January.
- Jongerden, MR, and BR Haverkort. 2009. "Which battery model to use?" *Software, IET* 3 (6): 445–457. doi:[10.1049/iet-sen.2009.0001](https://doi.org/10.1049/iet-sen.2009.0001).
- Panasonic. 2007. *Lithium Ion Batteries: Technical Handbook*. Technical report. Panasonic.
- Power-Sonic, Corporation. 2010. *Sealed Nickel-Metal Hydride Batteries. Model: NH-600AAA*.
- Rao, V., G. Singhal, A. Kumar, and N. Navet. 2005. "Battery Model for Embedded Systems." In *VLSI Design, 2005. 18th International Conference on*, 105–110. doi:[10.1109/ICVD.2005.61](https://doi.org/10.1109/ICVD.2005.61).
- Rasmussen, Jan. 2012. *WP1.5 Battery Modeling*. Technical report. Electric vehicles in a Distributed, Integrated market using Sustainable energy, and Open Networks (EDISON).
- Simpson, Chester. 2011. *LM2576, LM3420, LP2951, LP2952: Battery Charging*. Technical report. Texas Instruments.
- Tremblay, O., L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche. 2007. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles." In *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, 284–289. doi:[10.1109/VPPC.2007.4544139](https://doi.org/10.1109/VPPC.2007.4544139).
- Tremblay, Olivier, and Louis-A. Dessaint. 2009. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." In *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*.
- Waraich, Rashid A., Matthias D. Galus, Christoph Dobler, Michael Balmer, Göran Andersson, and Kay W. Axhausen. 2013. "Plug-in hybrid electric vehicles and smart grids: Investigations based on a microsimulation." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 28:74–86. doi:[10.1016/j.trc.2012.10.011](https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.10.011).

Zabala, Eduardo, Alfredi Rubio, Mikel Fernandez, and José Ángel Alzola. 2010. "Vehicle Characterization for Smart Charging and V2G strategies." *World Electric Journal*.



# PRESSUPOST

En aquesta secció es presentarà el pressupost del projecte. Al ser un projecte de simulació, els únics elements necessaris han estat els propis d'una oficina. El pressupost està dividit en el cost del material informàtic i el cost d'investigació i desenvolupament.

## Pressupost de recerca i desenvolupament

En la Taula 8.1 es mostra el pressupost referent a la mà d'obra.

**Taula 8.1:** *Pressupost de recerca i desenvolupament.*

Concepte	Preu per hora	Temps (h)	Total (€)
Investigació	25 €/h	280	7.000
Programació	25 €/h	300	7.500
Redacció	25 €/h	250	6.250
<b>TOTAL</b>		<b>830</b>	<b>20.750</b>

## Pressupost de materials informàtics

En la Taula 8.2 es mostra el pressupost referent al material informàtic.

**Taula 8.2:** Pressupost de materials informàtics.

Concepte	Preu per unitat	Unitats	Total (€)
Portàtil - Acer Aspire 5315	650 €/u	0,5	325
MATLAB® (estudiant)	—	—	—
<b>TOTAL</b>			<b>325</b>

## Suma per capítols

En la Taula 8.3 es mostra el pressupost total del projecte.

**Taula 8.3:** Suma per capítols.

Capítol	Preu (€)
Pressupost de recerca i desenvolupament	20.750,00
Pressupost de material informàtic	325,00
Subtotal	21.075,00
Costos indirectes (5% del subtotal)	1.053,75
 TOTAL	 22.128,75
IVA (21%)	4.647,03
<b>TOTAL</b>	<b>26.775,78</b>

Data: Dimarts, 3 de desembre de 2013

Vigència: 90 dies

Firma:

Maurici Yagües Gomà